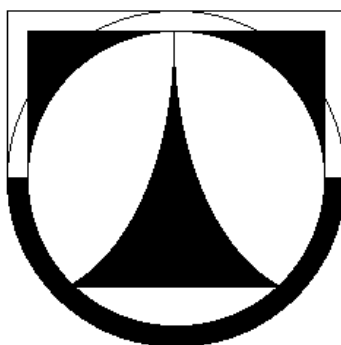


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

5.1.2010

Martin Kovář

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

**Vliv výrobní šarže na
mechanické vlastnosti polykarbonátu**

**Influence of production rank on
polycarbonate tensile properties**

Martin Kovář

KSP – TP – B62

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant bakalářské práce: Ing. Otakar Vedral – TREVOS, a.s.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	49
Počet tabulek:	14
Počet příloh:	0
Počet obrázků:	27

Datum: 5.1.2010



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Martin K O V Á Ř**

Studijní program **B2341 Strojírenství**

Studijní obor **3911R018 Materiály a technologie**

Zaměření **Tváření kovů a plastů**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Vliv výrobní šarže na mechanické vlastnosti polykarbonátu

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se zkouškami mechanických vlastností pro plasty.
2. Zajištění více výrobních šarží pro jeden materiál, výběr vhodných zkoušek.
3. Experimentální měření.
4. Vyhodnocení získaných výsledků.
5. Závěr.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: cca 30 stran
- grafické práce: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

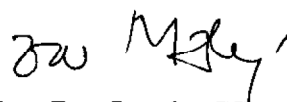
- [1] SOVA, A., KREBS, J. A KOL.: Termoplasty v praxi, Verlag Dashöffer Praha, 1994 - 2004
- [2] Články v odborných časopisech
- [3] KOLOUCH, J. : Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním, SNTL Praha, 1986

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Otakar Vedral [Trevos, a. s., Turnov]


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry




prof. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 30. 10. 2009

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Martin Kovář

Téma práce: Vliv výrobní šarže na mechanické vlastnosti polykarbonátu

Číslo BP: KSP – TP – B62

Vedoucí BP: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant: Ing. Otakar Vedral – TREVOS, a.s.

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním vlivu výrobní šarže na následné mechanické vlastnosti polykarbonátu. V teoretické části je popsán princip vstřikování, faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku, dále jsou uvedeny vlastnosti a použití polykarbonátu a popsány vybrané mechanické zkoušky. V experimentální části jsou provedeny tahové a ohybové zkoušky při rozdílných teplotách a závěrem jsou tyto zkoušky vyhodnoceny.

Abstract:

Baccalaureate work deals with investigation influence of production rank on polycarbonate resulting tensile properties. In theoretic parts is described principle injection, factors biasing characteristics and quality ejaculation, further are mentioned characteristics and using polycarbonate and set out choice mechanical examination. In experimental parts are effected tension and flexural examination at different temperatures and in fine are these examinations teamed with.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Turnově, 5.1.2010

.....
Martin Kovář
Máchova 2146
511 01 Turnov

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Radce Jínové, za psychickou podporu a čas strávený nad konzultacemi při problémech při studiu.

Dále děkuji panu Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D., za poskytnutí cenných rad a informací při studiu a v průběhu zpracování bakalářské práce .

V Turnově, 5.1.2010

.....
Martin Kovář

Obsah:

1. Úvod
 - 1.1 K volbě tématu
 - 1.2 Představení firmy
2. Teoretická část
 - 2.1 Princip vstřikování plastů
 - 2.2 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku
 - 2.3 Vlastnosti a použití polykarbonátu
 - 2.3.1 Výhody polykarbonátu
 - 2.3.2 Zpracování polykarbonátu
 - 2.3.3 Použití polykarbonátu
 - 2.4 Zkouška dle ČSN EN ISO 527 – Plasty – Stanovení tahových vlastností
 - 2.5 Zkouška dle ČSN EN ISO178 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností
 - 2.6. Další standardní metody hodnocení plastů
3. Experimentální část
 - 3.1 Materiál
 - 3.2 Vlastnosti vzorků odebraného materiálu
 - 3.3 Ohybová zkouška při teplotě 23°C
 - 3.3.1 Vzorky
 - 3.3.2 Podmínky při zkoušce
 - 3.3.3 Rozměry střední části vzorků pásek
 - 3.3.4 Naměřené hodnoty
 - 3.3.5 Zkušební zařízení
 - 3.3.6 Vyobrazení zkušebních vzorků
 - 3.3.7 Orientační zobrazení průběhu zkoušky
 - 3.3.8 Průběh zkoušek – grafy
 - 3.3.9 Vypočtené hodnoty
 - 3.4 Ohybová zkouška při teplotě 0°C
 - 3.4.1 Vzorky
 - 3.4.2 Podmínky při zkoušce
 - 3.4.3 Rozměry střední části vzorků pásek
 - 3.4.4 Naměřené hodnoty
 - 3.4.5 Průběh zkoušek – grafy
 - 3.4.6 Vypočtené hodnoty
 - 3.5 Tahová zkouška při teplotě 23°C
 - 3.5.1 Vzorky
 - 3.5.2 Podmínky při zkoušce
 - 3.5.3 Rozměry střední části vzorků pásek

- 3.5.4 Naměřené hodnoty
- 3.5.5 Zkušební zařízení
- 3.5.6 Vyobrazení zkušebních vzorků
- 3.5.7 Orientační zobrazení průběhu zkoušky
- 3.5.8 Průběh zkoušek - grafy
- 3.6 Tahová zkouška při teplotě 0°C
 - 3.6.1 Vzorky
 - 3.6.2 Podmínky při zkoušce
 - 3.6.3 Rozměry střední části vzorků
 - 3.6.4 Naměřené hodnoty
 - 3.6.5 Průběh zkoušek - grafy
- 4. Rozbor získaných výsledků
 - 4.1 Rozbor výsledků – ohybové vlastnosti 23°C
 - 4.2 Rozbor výsledků – ohybové vlastnosti 0°C
 - 4.3 Rozbor výsledků – tahové vlastnosti 23°C
 - 4.4 Rozbor výsledků – tahové vlastnosti 0°C
 - 4.5 Rozbor výsledků - shrnutí
- 5. Závěr

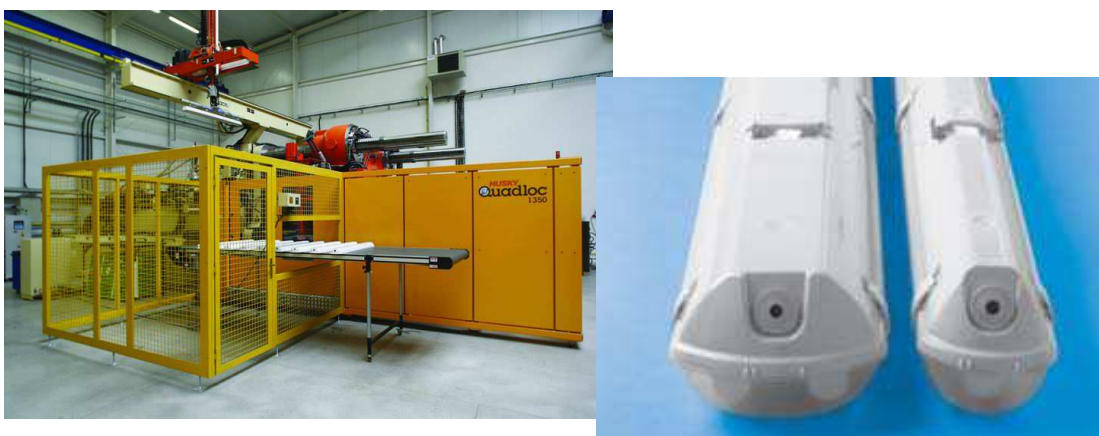
1. Úvod

1.1 K volbě tématu

Tato bakalářská práce byla vypracována na základě požadavku společnosti TREVOS, a.s., která se snaží svým odběratelům zaručit nejvyšší možnou jakost svých produktů – plastových průmyslových zářivkových svítidel. Proto je ve výrobním procesu kladen vysoký důraz na kvalitu základen (body) a světelně činných krytů (difuzor) těchto svítidel, neboť tyto dva důležité komponenty tvoří obal svítidla, který je z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví nejdůležitějším prvkem celého svítidla. Tato svítidla vynikají především v odolnosti proti vnikání prachu, a až na výjimky proti všem formám vody, a proto je obal svítidla velmi důležitý. Ten je vyráběn z polykarbonátu vstřikováním a svým rozsahem použití v praxi musí odolávat také rozdílným teplotním vlivům, UV záření nebo vlivům agresivního prostředí. Z tohoto důvodu se v bakalářské práci věnuji zkoumání vlivu výrobní šarže na mechanické vlastnosti polykarbonátu.

1.2 Představení firmy [1]

Firma TREVOS, a.s., se řadí mezi významné evropské výrobce průmyslových zářivkových svítidel. Pomocí nejmodernějších výrobních zařízení (obr. 1.2.1), vyrábí kvalitní výrobky, které dodává do více než 40 zemí světa.



Obr. 1.2.1 Výrobní zařízení a výrobky firmy TREVOS

Vznikla v roce 1990 v Semilech. Sériovou výrobu zářivkových svítidel pro všestranné použití zahájila v roce 1993. V roce 1995 dochází k užší specializaci výroby a orientaci na zářivková svítidla, která jsou vyráběná z odolných termoplastů.

V nově upraveném a zprovozněném výrobním areálu "Valdštejsko" v Turnově byla zahájena velkosériová výroba. V roce 1996 zaujal Trevos vedoucí pozici v počtu vyráběných zářivkových prachotěsných svítidel v České republice a tento primát drží dodnes. V roce 1999 dochází k transformaci společnosti TREVOS, s.r.o. na akciovou společnost TREVOS, se sídlem v Turnově.

Pro dosažení nejvyšší kvality výrobků je ve firmě zaveden systém řízení jakosti podle ČSN EN ISO 9001:2001.

2. Teoretická část

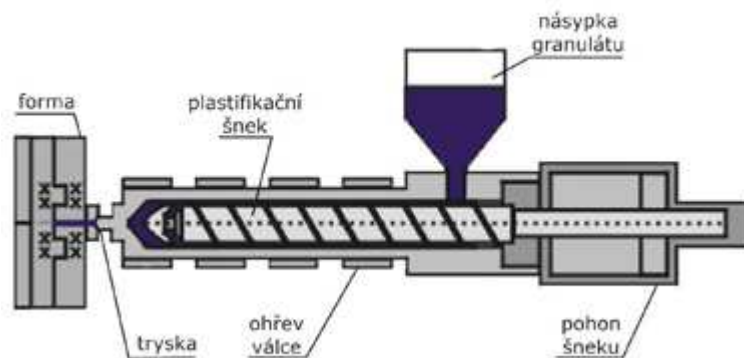
2.1 Princip vstřikování plastů [2]

Vstřikováním se vyrábějí takové výrobky, které mají buď charakter konečného výrobku a nebo jsou polotovary nebo díly pro další zkompletování samostatného celku. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií na zpracování plastů, je to proces diskontinuální, cyklický. Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a kaučuky.

Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové komory vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu. Výhody vstřikování jsou krátký čas cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem.

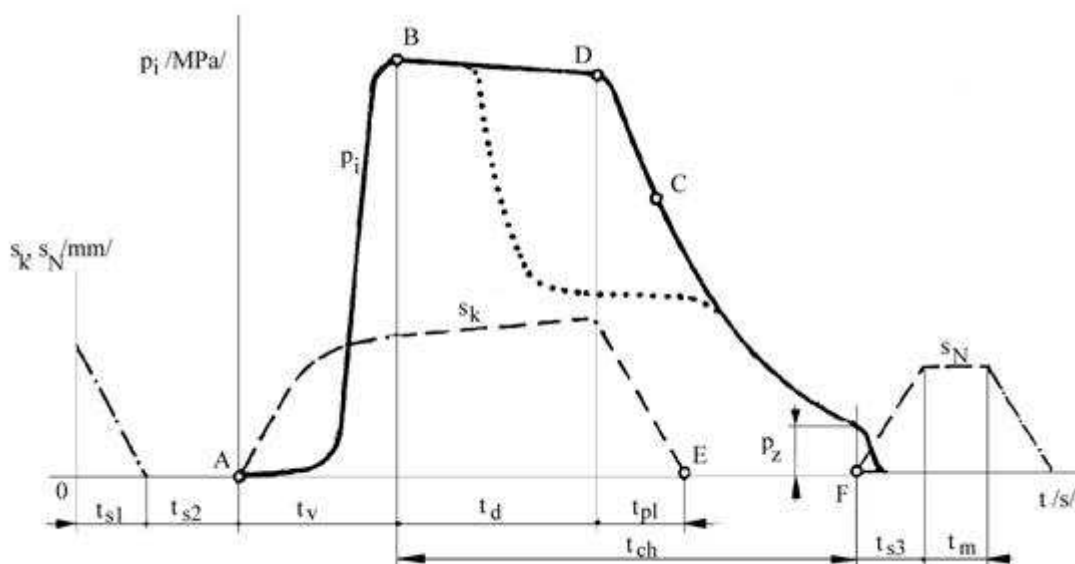
Postup vstřikování je následující: plast v podobě granulí je nasypán do násypky, z níž je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavící komory, kde za současného účinku tření a topení plast taje a vzniká tavenina. Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. Následuje tlaková fáze pro snížení smrštění a rozměrových změn. Plast předává formě teplo a ochlazením ztuhne ve finální výrobek. Potom se forma otevře a výrobek je vyhozen a celý cyklus se opakuje.

Vstřikovací cyklus (obr. 2.1.1) tvoří sled přesně specifikovaných úkonů. Jedná se o proces neizotermický, během něhož plast prochází teplotním cyklem. Při popisu vstřikovacího cyklu je nutno jednoznačně definovat jeho počátek. Za počátek cyklu lze považovat okamžik odpovídající impulsu k uzavření formy.



Obr. 2.1.1: Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus však můžeme posuzovat i z hlediska zpracovávaného plastu a s výhodou jej vyjádřit jako závislost tlaku v dutině formy na čase. Tento tlak se nazývá vnitřní tlak (obr. 2.1.2) a značí se p_i . Kromě vnitřního tlaku existuje i vnější tlak, označovaný p , kterým se myslí tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku.



Obr. 2.1.2: Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování ,

s_k – pohyb šneku, s_N – pohyb nástroje

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu, pohyblivá část formy se přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne – strojní časy. Tyto činnosti je nutné odlišit, protože na přisouvání formy se musí vynaložit jen malá přisouvací síla F_p , zatímco na uzamknutí je nutno vynaložit značně vyšší uzavírací sílu F_u (až třikrát vyšší), neboť musí být zaručeno, že se forma vlivem tlaku taveniny při vstřikování neotevře. Následuje pohyb šneku v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této fázi šnek vykonává

pouze axiální pohyb, neotáčí se a vlastně plní funkci pístu. Po naplnění formy je tavenina v dutině ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty.

Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne. Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku. V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení je závislá na teplotě formy T_F a tloušťce stěny výrobku. Během chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem, a aby se na výstřiku netvořily propadliny a staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy – dotlak. Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak nebo se může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Dotlak se proto rozděluje na izobarický a izochorický. Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu - polštář, na který bude šnek působit svým čelem. Tento objem nesmí být moc velký (obvykle kolem 10 až 15 %, méně než jednonásobek průměru šneku D), aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty.

Po dotlaku začíná plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastikuje ji a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. protitlak neboli zpětný tlak. Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak převodem tepla ze stěn válce, jednak frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Jestliže je tavicí komora opatřena samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě. Dále může a nebo nemusí následovat odsunutí tavicí komory od formy. Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z , což je tlak, pod nímž se hmota nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které u křehkých hmot mohou způsobovat až samovolné praskání výstřiku. Zbytkový tlak lze snížit buď zkrácením doby dotlaku anebo programovaným průběhem tlaku během dotlaku. Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí z formy.

2.2 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

O mechanických a fyzikálních vlastnostech výstřiku a o jeho kvalitě rozhoduje druh plastu, technologické parametry, konstrukce formy a volba stroje.

Jednotlivé parametry nepůsobí samostatně, ale vždy se ovlivňují navzájem. Z hlediska volby druhu plastu má na vlastnosti výstřiku vliv:

- rychlost plastikace polymeru, která by měla být co nejkratší,
- tekutost (reologické vlastnosti) plastu, která má být dostatečná a nesmí se měnit s teplotou příliš rychle a která je ovlivňována technologickými parametry,

- dostatečná tepelná stabilita plastu v rozsahu zpracovatelských teplot, která by měla být co nejširší,
- uvolňování těkavých látek,
- velikost vnitřního pnutí, které má být co nejnižší,
- smrštění plastu (změna rozměrů výrobku oproti rozměrům tvarové dutiny formy) v jednotlivých směrech na výrobku, které je ovlivněno technologickými podmínkami.

Z technologických parametrů, které se mezi sebou výrazně ovlivňují, má na vlastnosti vstřiku a jednotlivé fáze vstřikování největší vliv:

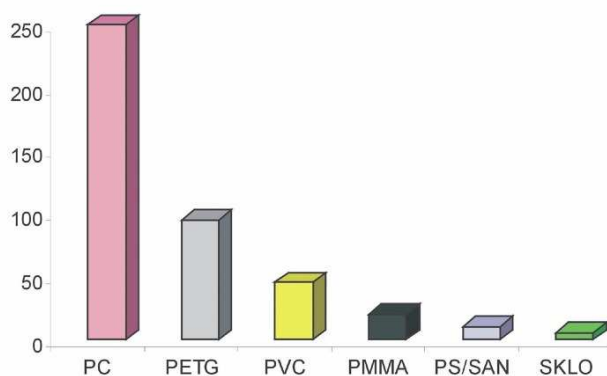
- vstřikovací tlak (ovlivňuje rychlost plnění, uzavírací sílu, vnitřní pnutí, smrštění, orientaci – tj. narovnávání makromolekul do směru toku, atd.),
- teplota taveniny (konkrétní teplota závisí na druhu plastu a ovlivňuje tekutost plastu, vstřikovací tlak, dobu chlazení a tedy dobu cyklu, smrštění, tlakové ztráty, dotlak, atd.)
- teplota formy (konkrétní teplota závisí na druhu plastu a na charakteru výrobku, ovlivňuje tekutost plastu, rychlost plnění, dobu chlazení, lesk výrobku, povrch výrobku, teplotu taveniny, dotlak, vnitřní pnutí, smrštění, atd. – z technologického hlediska má být co nejvyšší, hlavně u semikrystalických plastů),
- rychlost plnění dutiny formy má být co nejvyšší, je však nutné kontrolovat teplotu taveniny, aby nedošlo k degradaci hmoty, nevýhodou je i vysoká orientace makromolekul,
- výše a doba trvání dotlaku (ovlivňuje hlavně rozměry výrobku, smrštění a vnitřní pnutí).

2.3 Vlastnosti a použití polykarbonátu [3]

V roce 1953 se podařilo nezávisle dvěma vědcům syntetizovat zcela novou skupinu polymerů – polykarbonáty (PC). H. Schnell (Bayer, Německo) patentoval svůj objev pod obchodním názvem Makrolon[®], D. Fox (General Electric, USA) pod názvem Lexan[®]. Polymerní řetězec opakuje uhličitánové skupiny a polykarbonáty jsou ve skutečnosti polyester kyseliny uhličitě. Polykarbonát spojuje řadu velmi dobrých vlastností, kterých nebylo dosud souhrnně dosaženo u žádného dalšího typu termoplastů.

2.3.1 Výhody polykarbonátu

- vysoká rázová houževnatost (obr. 2.3.1), téměř konstantní v neobvykle širokém rozmezí teplot (od –70 do 140°C)
- vysoká světelná propustnost, přes 80 % (závisí na typu a tloušťce desky)
- výborná odolnost k povětrnostním vlivům, ve spojení s koextrudovanou vrstvou UV filtru vykazuje vysokou odolnost proti „stárnutí“ vlivem klimatických změn; ochrana proti UV záření zajišťuje zachování optických i mechanických vlastností
- nízká specifická hmotnost



Obr. 2.3.1: Srovnání rázové houževnatosti různých materiálů v kJ/m²

2.3.2 Zpracování polykarbonátu

Polykarbonát je vyráběn ve formě granulí nebo pelet, které se dále zpracovávají za použití tepla a tlaku do požadovaného tvaru. Nejběžnějšími metodami zpracování jsou vytlačování (extruze) a vstřikování.

Vytlačování (extruze)

Materiál v plastickém stavu je vytlačován hlavou různého tvaru do volného prostoru, kde tuhne. Tato metoda se používá k výrobě profilů, trubek, fólií a plných i dutinkových desek.

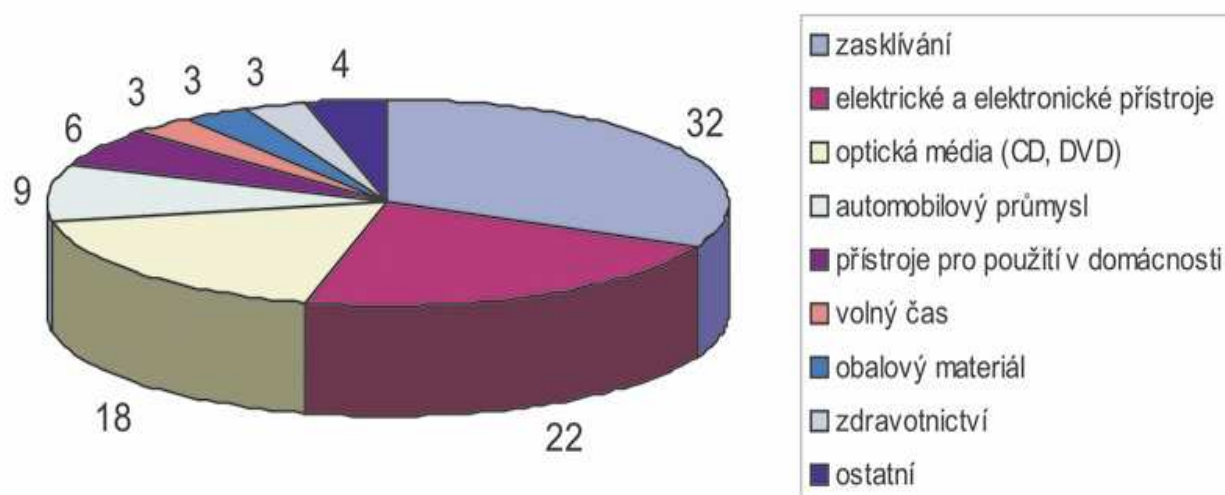
Vstřikování

Roztavené granule polykarbonátu se vstřikují do chlazené formy. Po vyplnění tvářecí dutiny tavenina tuhne a je z dutiny formy následně vyhozena. Tato metoda se používá k výrobě optických médií (CD a DVD), plášťů elektronických zařízení a domácích potřeb, součástek pro automobilový průmysl atd.

2.3.3 Použití polykarbonátu

Světová spotřeba polykarbonátu je asi 3 milióny tun ročně a každoročně roste zhruba o 10 %, především díky vývoji nových typů polykarbonátů a novým aplikacím. Je kompatibilní s řadou dalších polymerů. Běžně se polykarbonát modifikuje pryží, která ještě zvyšuje rázovou houževnatost materiálu. Směs PC/PBT zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu při nízkých teplotách a zlepšuje odolnost vůči povětrnostním vlivům.

Unikátní vlastnosti polykarbonátu a jeho kompatibilita s jinými polymery umožňují jeho široké použití v řadě odvětví (obr. 2.3.3). Největší množství polykarbonátu se spotřebuje ve stavebnictví pro veškeré ploché i obloukové zasklívání – zastřešení teras, vnitřních stropů, světlíků a světelných pásů, dále zimních zahrad a skleníků, městského mobiliáře, dále jako protihlukové stěny.



Obr. 2.3.3: Hlavní oblasti využití polykarbonátu v Evropě v roce 2005 (v %).

Značné množství polykarbonátu se uplatňuje při výrobě elektrických přístrojů a zařízení, plášťů mobilních telefonů, počítačů, přístrojů pro domácnost, krytů svítidel a podobně. Jeho vynikající nárazová odolnost chrání přístroje před poškozením, povrchový vzhled může být navržen tak, aby odpovídal nejnovějším barevným trendům.

Dnešní automobilový průmysl vyžaduje materiály s vysokými užitnými vlastnostmi, s nízkou hmotností, možností tvarování do aerodynamického tvaru a především zajišťující bezpečnost cestujících. Všem těmto požadavkům polykarbonát vyhovuje. Boční zrcátka, přední svítlny, mlhovky, směrové ukazatele, dnes už i boční a zadní okna jsou vyrobeny z polykarbonátu a jejich tvar dává automobilu jedinečný vzhled. Polykarbonát se uplatňuje i v interiérech automobilů při výrobě přístrojových desek a bočních panelů.

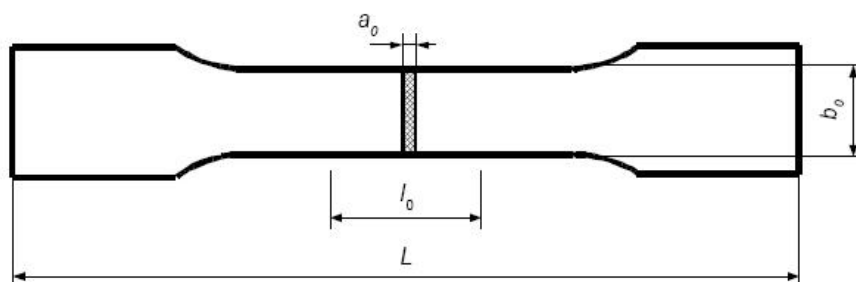
Mechanické vlastnosti polykarbonátu jsou tedy z hlediska bezpečnosti použití tohoto polymeru velmi sledovanou hodnotou. Proto je dokazování a sledování těchto vlastností ve většině případů normalizováno. Jedná se zejména o zkoušku tahem, tlakem nebo o zkoušku rázové a vrubové houževnatosti apod. [4]

2.4 Zkouška dle ČSN EN ISO 527 – Plasty – Stanovení tahových vlastností [6], [7]

Jednou ze základních a vůbec nejdůležitějších zkoušek mechanických vlastností je zkouška tahem. Podstatou zkoušky je protahování zkušebního tělesa (obr. 2.4.1) ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty.

Zkouška se provádí na zkušebních tělesech, která mohou být buď tvářena na zvolený rozměr nebo zhotovena mechanickým obráběním, řezáním nebo vysekáváním z hotových výrobků nebo polotovárů, jako jsou výlisky,

lamináty, fólie a vytlačované nebo odlévané desky. V našem případě byla zkušební tělesa vystříknuta. Zkušební tělesa se upínají do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela přesně v ose čelistí stroje.



Obr. 2.4.1: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Během zatěžování plynule rostoucí silou se zkušební těleso deformuje, až při určitém tahovém zatížení dojde k destrukci.

Při zkoušce se siloměrovým snímačem registruje tahová síla **F** působící na zkušební těleso a průtahoměrem relativní změna počáteční měřené délky ΔL_0 zkušebního tělesa v průběhu zkoušky.

V každém požadované směru zkoušení a pro každou hodnocenou vlastnost (mez pevnosti v tahu atd.) musí být zkoušeno minimálně pět zkušebních těles.

Výpočet napětí

Všechny hodnoty napětí, které jsou z dosažených výsledků vypočteny, jsou vztaženy k počáteční ploše příčného průřezu zkušebních těles **S₀ [mm²]**.

$$S_0 = a_0 \cdot b_0 \quad (2.4.1)$$

S₀ – plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [mm²]

a₀ - šířka zúžené části zkušebního tělesa [mm]

b₀ - výška zúžené části zkušebního tělesa [mm]

Vzhledem k tomu, že osové tahové zatížení silou **F [N]** působí kolmo na ploše příčného průřezu, jedná se o napětí normálové (jmenovité), označované písmenem **σ [MPa]**.

$$\sigma = F / S_0 \quad (2.4.2)$$

σ – vyhodnocovaná hodnota tahového napětí [MPa]

F – příslušná naměřená hodnota síly [N]

S₀ – plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [mm²]

Výpočet poměrného prodloužení

Všechny hodnoty poměrného prodloužení ϵ [-, %] se vypočítají na základě počáteční měřené délky L_0 [mm].

$$\epsilon = \Delta L_0 / L_0 \quad (2.4.3)$$

$$\epsilon \% = 100 \times \Delta L_0 / L_0 \quad (2.4.4)$$

ϵ – vyhodnocovaná hodnota poměrného prodloužení [-, %]

L_0 – počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm]

ΔL_0 – zvětšení délky zkušebního tělesa mezi značkami vyznačujícími počáteční měřenou délku [mm].

Z uvedených vztahů vyplývá, že zaznamenávaná závislost **F** na **ΔL** odpovídá závislosti **σ** na **ϵ** , kde **σ [MPa]** je smluvní jmenovité napětí. Nazývá se smluvním nebo pracovním diagramem zkoušky tahem (obr. 2.4.1). Počáteční přímkový úsek diagramu vyjadřuje úměrnost napětí a deformace podle Hookeova zákona.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.4.5)$$

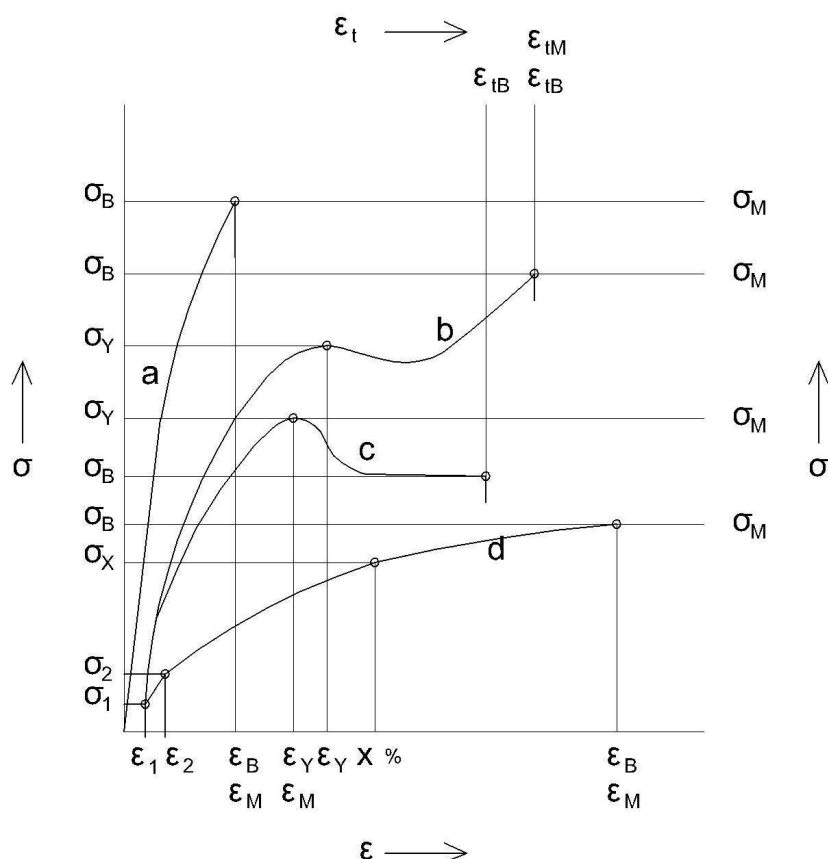
σ – vyhodnocovaná hodnota tahového napětí [MPa]

E - Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

ϵ – vyhodnocovaná hodnota poměrného prodloužení [-]

Mezní hodnota Hookeova zákona se označuje jako mez úměrnosti σ_u . Nad mezí úměrnosti roste pak deformace rychleji a křivka se odchyluje od přímkového průběhu až do meze pružnosti σ_E . Veškeré deformace, které nastávají v materiálu do této hodnoty napětí mají charakter deformace pružné a jsou tedy vratné.

V technické praxi se za mez pružnosti bere napětí způsobující první trvalou deformaci. Zjišťování této meze je velmi obtížné a zdoluhavé. U některých materiálů se objevuje na počátku oblasti plastické deformace úsek rychlejšího prodlužování – tato část je charakterizována mezí kluzu σ_y . Mez kluzu je tedy nejmenší napětí, při němž dochází ke zvyšování protažení bez zvyšování napětí. Toto napětí může být nižší, než maximální napětí během zkoušky (obr. 2.4.1, křivka *b* a *c*). Mez kluzu je pro materiál velice důležitou charakteristikou. Jedná se o základní kritérium pro výpočet dovoleného namáhání.



Křivka a Křehké materiály
 Křivka b a c Houževnaté materiály s mezí kluzu
 Křivka d Houževnaté materiály bez meze kluzu

Obr. 2.4.1 Typické křivky napětí / poměrné prodloužení

Při růstu napětí nad mez kluzu se zkušební tyč deformuje po celé délce. Na diagramu se to projeví stoupající větví křivky, která končí a okamžiku, kdy tahová síla dosahuje nejvyšší hodnoty před přetržením tyče. Z tohoto maximálního zatížení se určuje mez pevnosti v tahu σ_M , tedy maximální napětí v tahu, působící na zkušební těleso během zkoušky.

Po překročení této maximální hodnoty u tvárného materiálu křivka tahového diagramu klesá až do okamžiku destrukce. Deformace se soustředí do jednoho místa, objeví se krček zátěžná síla začíná klesat. Tyč se přetrhne v místě nejmenšího průřezu. Napětí v tahu, při kterém dochází k přetržení zkušební tělesa se nazývá napětí v tahu při přetržení σ_B .

Dle ČSN EN ISO 527 definujeme následující prodloužení a jmenovité prodloužení:

Poměrné prodloužení na mezi kluzu ϵ_Y , které odpovídá napětí na mezi kluzu σ_Y (obr. 2.4.1, křivka b a c)

Poměrné prodloužení při přetržení ϵ_B při odpovídajícím napětí v tahu při přetržení σ_B , jestliže dojde k přetržení bez meze kluzu (obr. 2.4.1, křivky *a* a *d*)

Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu ϵ_M odpovídající mezi pevnosti v tahu σ_M v případech, je-li této meze pevnosti dosaženo bez meze kluzu (obr. 2.4.1 křivky *a* a *d*) nebo na mezi kluzu. Pro hodnoty pevnosti vyšší než je napětí na mezi kluzu platí jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu.

Jmenovité poměrné prodloužení ϵ_t je zvětšení délky vztažené na jednotku původní vzdálenosti mezi čelistmi. Používá se pro hodnoty poměrného prodloužení za mezi kluzu σ_y .

Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB} odpovídající napětí při přetržení σ_B , dochází-li k přetržení zkušební tělesa za mezi kluzu σ_y (obr. 2.4.1 křivky *b* a *c*).

Jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu ϵ_{tM} odpovídá mezi pevnosti v tahu σ_M , pokud se tento bod nachází za mezi kluzu (obr. 2.4.1 křivka *b*).

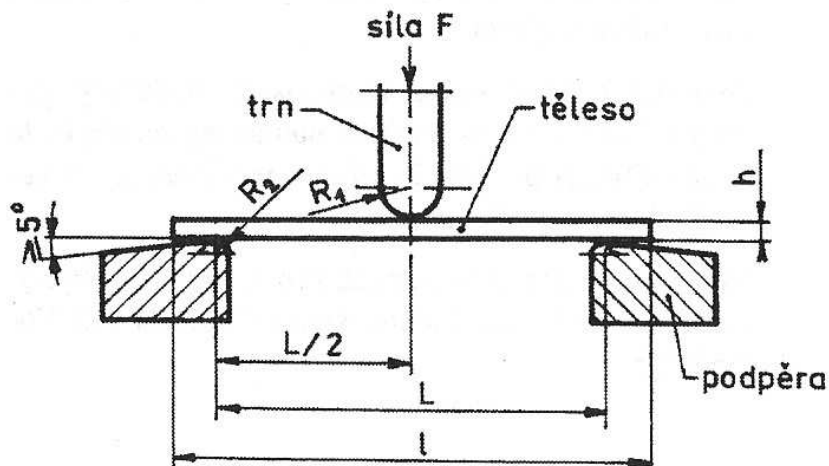
Pracovní diagram PC odpovídá křivce *c* z obr. 2.4.1, v experimentální části byly tedy zkoumány hodnoty jmenovitého poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB} a pevnosti v tahu σ_M .

2.5 Zkouška dle ČSN EN ISO 178 - Plasty - Stanovení ohybových vlastností [5]

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti *E* u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

Při zkoušce je zkušební těleso (obr. 2.6.1) podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty (ČSN EN ISO178).



Obr. 2.6.1: Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky.

Způsob přípravy zkušebních těles, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou zakotveny pro daný typ materiálů v příslušných normách. Normy pro stanovení ohybových vlastností plastů jsou tyto: tříbodový systém pro plasty ČSN EN ISO178, tříbodový systém pro nevztužené i vztužené plasty a elektrické izolátory ASTM D 790 (American Society for Testing and Materials), čtyřbodový systém pro nevztužené i vztužené plasty a elektrické izolátory ASTM D 6272.

Norma ČSN EN ISO178 uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností tuhých a polotuhých plastů za definovaných podmínek. Je definováno standardní zkušební těleso, ale tam kde je to vhodné, lze volit alternativní rozměry těles. Je udána řada hodnot rychlostí zkoušky.

Metoda se používá ke zjištění chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčením trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb). Zkušební těleso je konstantní rychlostí prohýbáno trnem tak dlouho, dokud se nezlomí, nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty.

Metoda je vhodná pro následující materiály

- vstříkované a vytlačované termoplasty
- lisovací reaktoplasty
- vlákny vztužené reaktoplastové a termoplastové kompozity

Podpěry a zatěžovací trn

Dvě podpěry a zatěžovací trn uprostřed musí být uspořádány podle obrázku 2.6.1. Poloměr trnu R_1 a poloměr podpěr R_2 musí být následující:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm pro tloušťky tělesa} \leq 3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm pro tloušťky tělesa} > 3 \text{ mm}$$

Přednostní typ tělesa

Rozměry přednostního zkušební tělesa jsou:

$$\text{délka } l = (80 \pm 2) \text{ mm}$$

$$\text{šířka } b = (10 \pm 0,2) \text{ mm}$$

$$\text{tloušťka } h = (4 \pm 0,2) \text{ mm}$$

Ostatní zkušební tělesa

Délka a tloušťka zkušební tělesa musí být ve stejném poměru jako u přednostního tělesa, tj.:

$$l/h = (20 \pm 1) [\text{mm}] \quad (2.6.1)$$

l – délka zkušební tělesa [mm]

h – tloušťka zkušební tělesa [mm]

Hodnoty šířky b ve vztahu k tloušťce h :

$$3 < h \leq 5 \quad b = (10 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$5 < h \leq 10 \quad b = (15 \pm 0,5) \text{ mm}$$

Rozpětí podpěr L se nastaví tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %) :

$$L = (16 \pm 1)h$$

Rychlost zkoušky se nastaví dle požadavků v předmětové normě zkoušeného materiálu. Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 2 mm/min pro přednostní těleso).

V průběhu zkoušky se zaznamenává velikost síly F [N] a odpovídajícího průhybu s [mm], který je definován jako vzdálenost, o kterou se během ohybu vychýlí horní nebo spodní plocha zkušební tělesa uprostřed rozpětí podpěr ze své původní polohy.

V každém požadované směru zkoušení a pro každou hodnocenou vlastnost (mez pevnosti v tahu atd.) musí být zkoušeno minimálně pět zkušebních těles.

Výpočet napětí v ohybu

Napětí v ohybu σ_f [MPa], definované jako jmenovité napětí vnějšího povrchu zkušebního tělesa uprostřed rozpětí podpěr se vypočítá ze vztahu:

$$\sigma_f = 3F_{\max}L/2bh^2 \quad (2.6.2)$$

σ_f – příslušné napětí v ohybu [MPa]

F – použitá síla [N]

L – rozpětí [mm]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

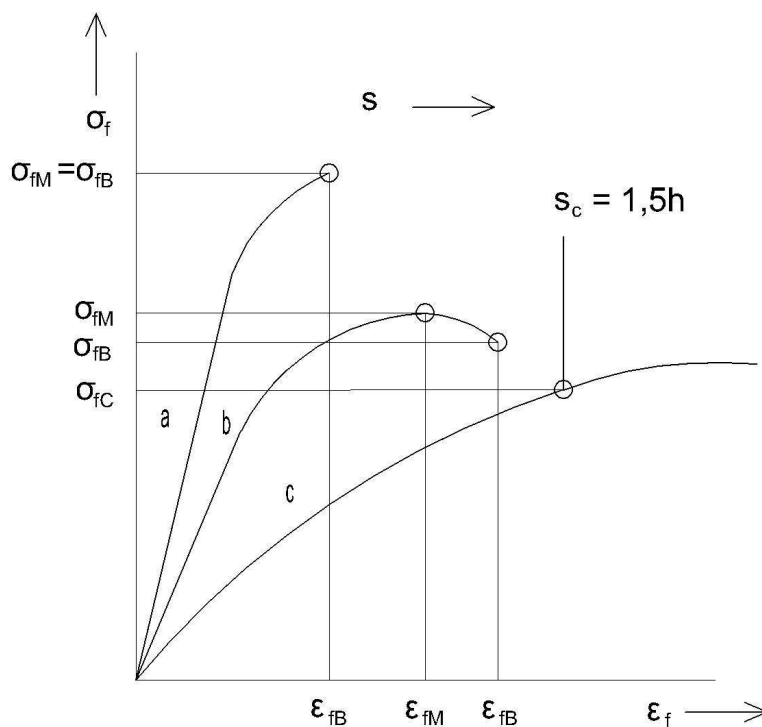
Dle ČSN EN ISO 178 definujeme následující napětí.

Napětí v ohybu v okamžiku lomu σ_{fB} v okamžiku lomu zkušebního tělesa (obr. 2.6.2 křivka a a b)

Pevnost v ohybu σ_{fM} v jako nejvyšší napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky ohybem (obr. 2.6.2 křivka a a b)

Napětí v ohybu při smluvním průhybu σ_{fC} napětí v ohybu při smluvním průhybu s_c , který je definován jako průhyb rovnající se 1,5 násobku tloušťky h zkušebního tělesa (obr. 2.6.2 křivka c)

Křivka napětí v ohybu σ_f versus deformace ohybem ϵ_f pro PC odpovídá křivce c z obr. 2.6.2 s tím, že smluvní průhyb zde nebyl definován v souladu s ČSN jako 1,5 násobku tloušťky h , ale jako dotyk zkušebního tělíska se vzorkem. V experimentální části byly tedy zkoumány hodnoty průhybu s a nejvyššího napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky - pevnosti v ohybu σ_{fM} .



- Křivka a Zkušební těleso se zlomí před mezí kluzu
 Křivka b Zkušební těleso vykazuje na křivce maximum a poté se zlomí před
 dosažením smluvního průhybu s_c

Obr. 2.6.2 Typické křivky napětí v ohybu σ_f versus deformace ohybem ϵ_f

2.6 Další standardní metody hodnocení plastů

PC lze podrobit i dalším metodám hodnocení dle:

- ČSN EN ISO 604 – Plasty – stanovení tlakových vlastností
- ČSN 640128 – Zkoušky tuhých nekovových materiálů. Tvrdost podle Brinella
- ČSN EN ISO 868 - Plasty a ebonit - Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)
- ČSN EN ISO 179 - Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy
- ČSN EN ISO 180 - Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod
- ČSN 64 0611 - Zkoušení plastických hmot. Stanovení rázové a vrubové houževnatosti plastických hmot metodou Dynstat
- atd.

S ohledem na způsob namáhání výsledných komponentů – obalu průmyslového zářivkového svítidla – však postačí analýza výsledků zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 527 a ohybem dle ČSN EN ISO 178.

3. Experimentální část

3.1 Materiál

Pro vstřikování těchto mnohdy velmi teplotně namáhaných polotovarů - základů (body) a světelně činných krytů (difuzor) - doporučil výrobce Bayer AG, Leverkusen, Německo, polykarbonát s označením Macrolon R30. Výrobce deklarované vlastnosti jsou uvedené v tab.3.1.1:

Tab. 3.1.1: Vlastnosti R30

Vlastnost	Okrajové podmínky	Jednotka	Standard	Hodnota
Objemový index toku taveniny	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /(10 min)	ISO 1133	33
Hmotnostní index toku taveniny	300 °C; 1.2 kg	g/(10 min)	ISO 1133	35
Modul pružnosti v tahu	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2100
Pevnost v tahu	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	55
Tažnost	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	5.5
Rázová houževnatost	23 °C	kJ/m ²	C ISO 179/1eU	N
Rázová houževnatost	23 °C; 3.2 mm	kJ/m ²	acc. ISO 180/A	50P
Vicat teplota měknutí	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	142
Hustota		kg/m ³	ISO 1183	1200

3.2 Vlastnosti vzorků odebraného materiálu

Ve výrobním procesu firmy TREVOS, a.s., byly v průběhu několika měsíců odebrány 3 vzorky (tab. 3.2.1) materiálu uvedeného v kapitole 3.1 různých výrobních šarží, pro zjištění výsledných mechanických vlastností.

Tab. 3.2.1: Odebrané vzorky a jejich parametry dle výrobce

	Vzorek P1	Vzorek P2	Vzorek P3
Datum odběru	3.2.2009	8.1.2009	11.12.2008
Šarže	8120344	9120004	8120011
Číslo balení	2201901	2051884	2051854
Objemový index toku taveniny	28,680	30,640	29,200
Množství v balení	1100 kg	1000 kg	1000 kg

Z těchto vzorků byla ve výrobních prostorách TU v Liberci vystříknuta zkušební tělesa dle požadavků normy ČSN EN ISO 527 a ČSN EN ISO 178

na těchto zkušebních tělesech byly následně prováděny mechanické zkoušky dle těchto ČSN.

3.3 Ohybová zkouška

3.3.1 Vzorky

3 série vzorků různých výrobních šarží (tab. 3.2.1):

1. série P1 – výrobní šarže 8120344
2. série P2 – výrobní šarže 9120004
3. série P3 – výrobní šarže 8120011

3.3.2 Podmínky při zkoušce

Okolní teplota: teplota v laboratoři $23 \pm 2,5^\circ\text{C}$
Zařízení: zařízení pro tahové a tlakové zkoušky se zatěžovacím trnem a podpěrami
Zatěžovací trn: poloměr 5,0mm
Podpěry: rozpětí 70mm
Měřicí délka: max.56,5mm - od přepětí (dotyku zkušebního tělíska se vzorkem)
Rychlost posuvu: 25mm/min
Zkouška končí dosažením průhybu max.56,5mm.

Zaznamenané hodnoty – (viz obr. 3.3.8.1-3):

- maximální síla **F** [N]
- průhyb **s** vzorku při maximální síle [mm]

3.3.3 Rozměry střední části vzorků pásek

Všechny vzorky byly vystříknuty na standardní rozměr (tab.3.3.3) určený normou.

Tab. 3.3.3: Rozměry zkušebních vzorků

vzorek č.	série P1	série P2	série P3
	rozměry v mm	rozměry v mm	rozměry v mm
1.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
2.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
3.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
4.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
5.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
6.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95

délka=l; šířka=b; tloušťka=h

3.3.4 Naměřené hodnoty

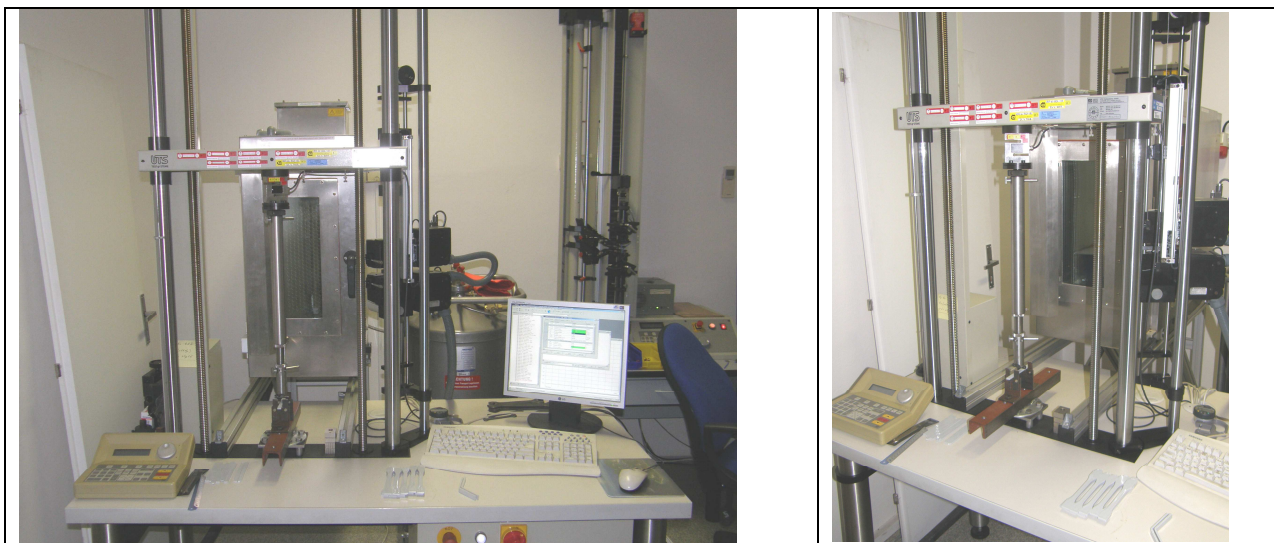
Hodnoty naměřené při zkoušce byly pro přehlednost zaznamenány do tab. 3.3.4.

Tab. 3.3.4: Naměřené hodnoty při zkoušce ohybem

vzorek č.	série P1		série P2		série P3	
	Síla F	Průhyb s	Síla F	Průhyb s	Síla F	Průhyb s
	N	mm	N	mm	N	mm
1.	143,200	12,96	141,200	12,90	139,250	12,65
2.	146,050	13,72	140,900	13,83	143,650	13,51
3.	145,700	12,14	142,850	13,66	137,650	12,84
4.	142,850	13,62	143,500	13,22	140,950	12,48
5.	145,750	12,41	142,700	13,71	142,100	12,61
6.	143,900	12,84	142,650	13,73	141,750	12,13

3.3.5 Zkušební zařízení

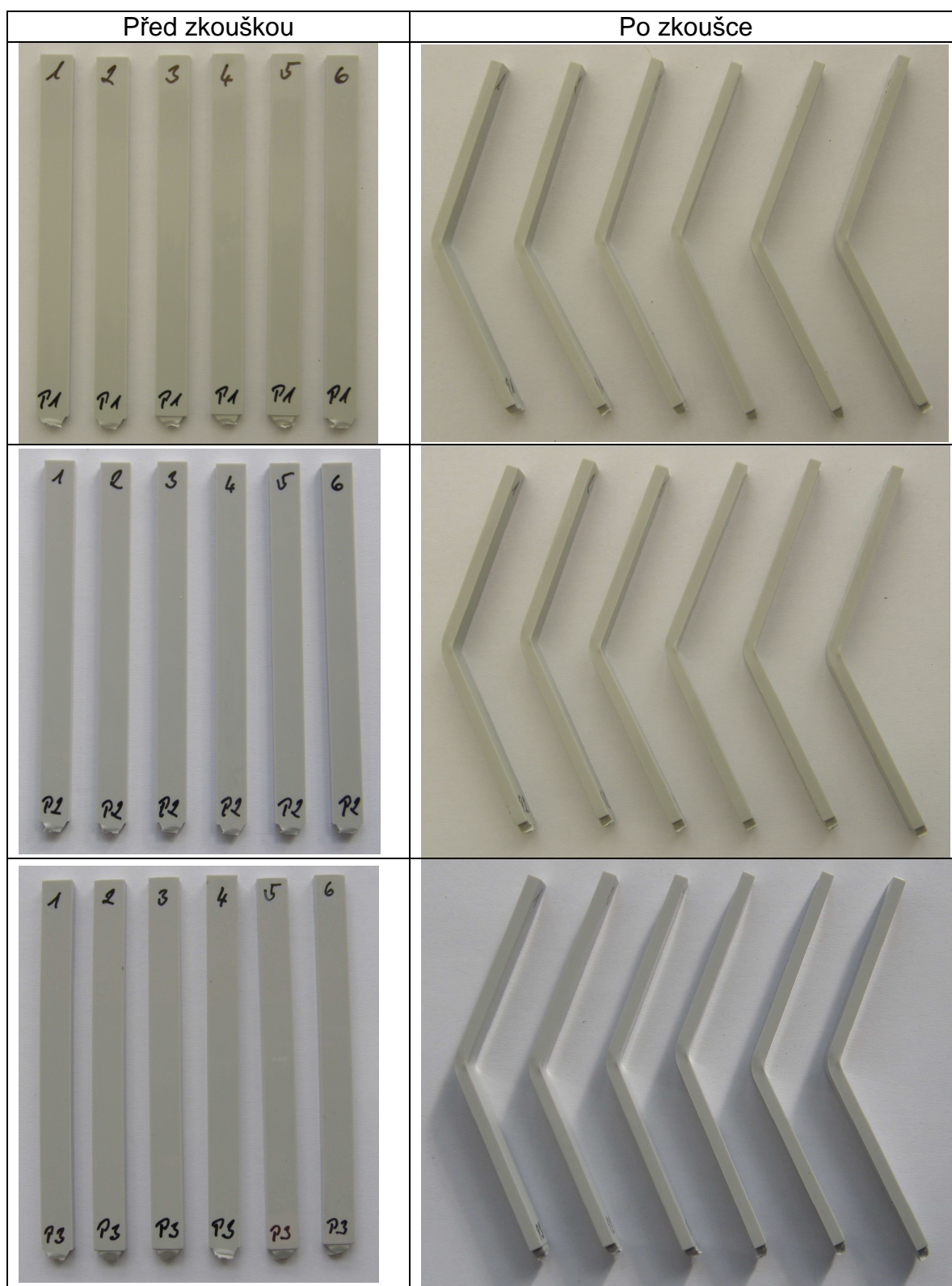
Zkušební zařízení pro zkoušku ohybem (obr. 3.3.5) bylo propojeno s osobním počítačem a výsledné hodnoty odečítány z LCD displeje.



Obr.3.3.5: Zkušební zařízení pro tahové a tlakové zkoušky

3.3.6 Vyobrazení zkušebních vzorků

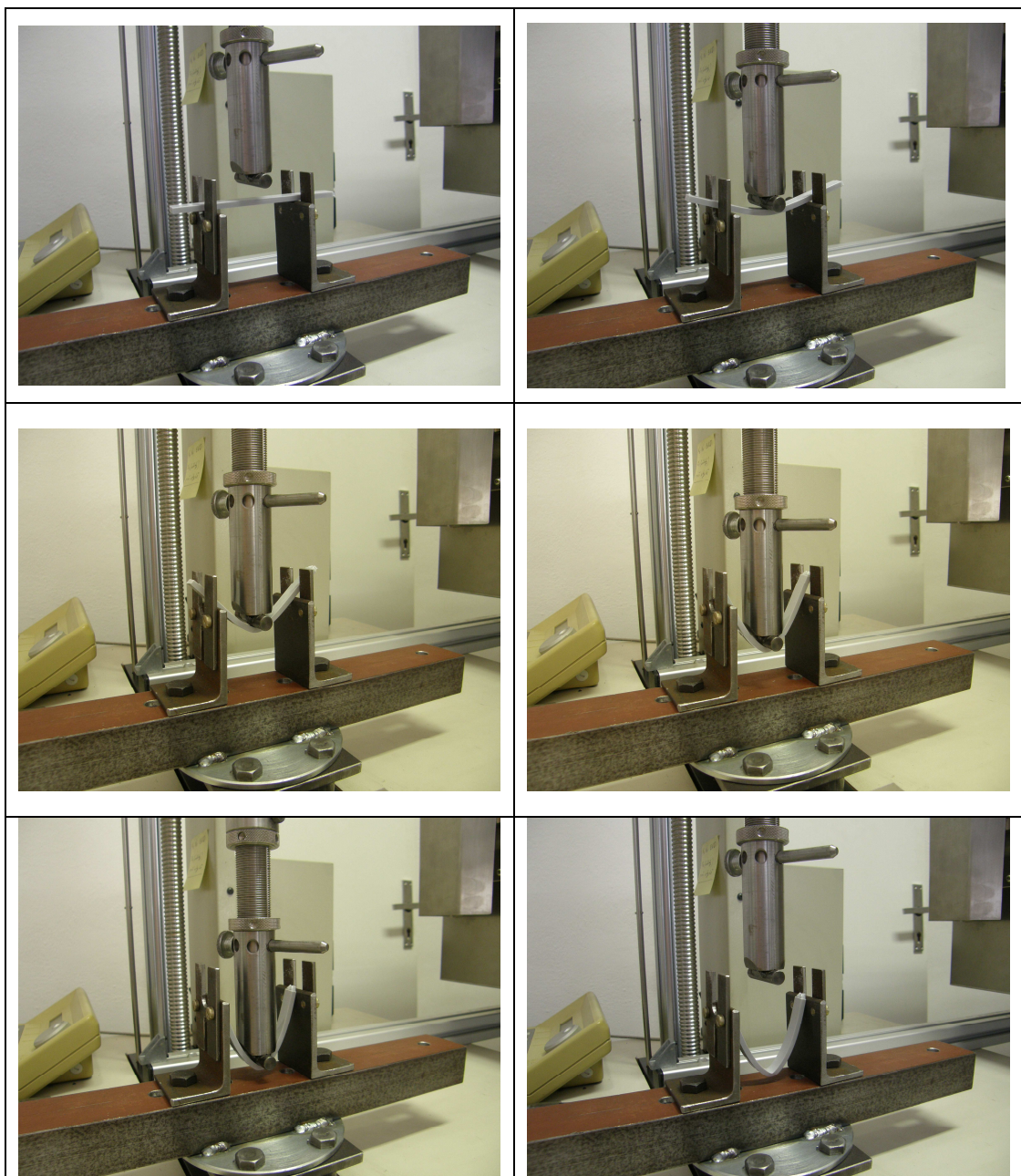
Pro přehlednost byly zkušební vzorky před a po zkoušce zaznamenány a seřazeny (obr. 3.3.6)



Obr.3.3.6: Zkušební vzorky před a po zkoušce

3.3.7 Orientační zobrazení průběhu zkoušky

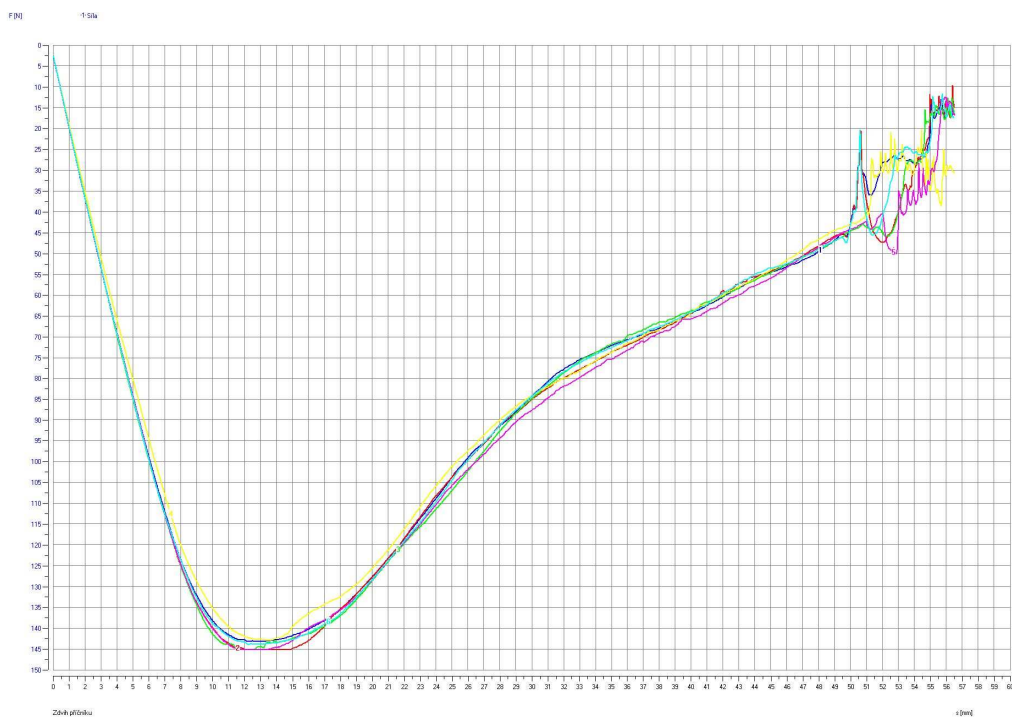
Průběh všech zkoušek byl zaznamenán na videokameru a ze záznamu byly pořízeny statické fotografie průběhu zkoušky (obr.3.3.7).



Obr.3.3.7: Průběh zkoušky

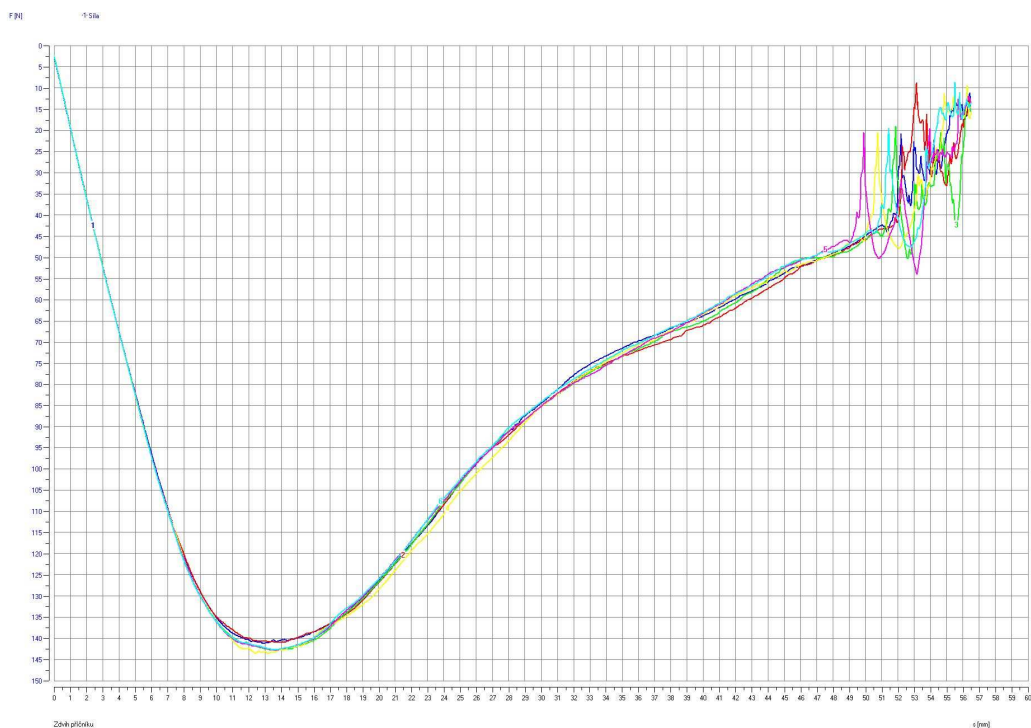
3.3.8 Průběh zkoušek - grafy

Vzorky série P1 - graf průběhu zkoušky



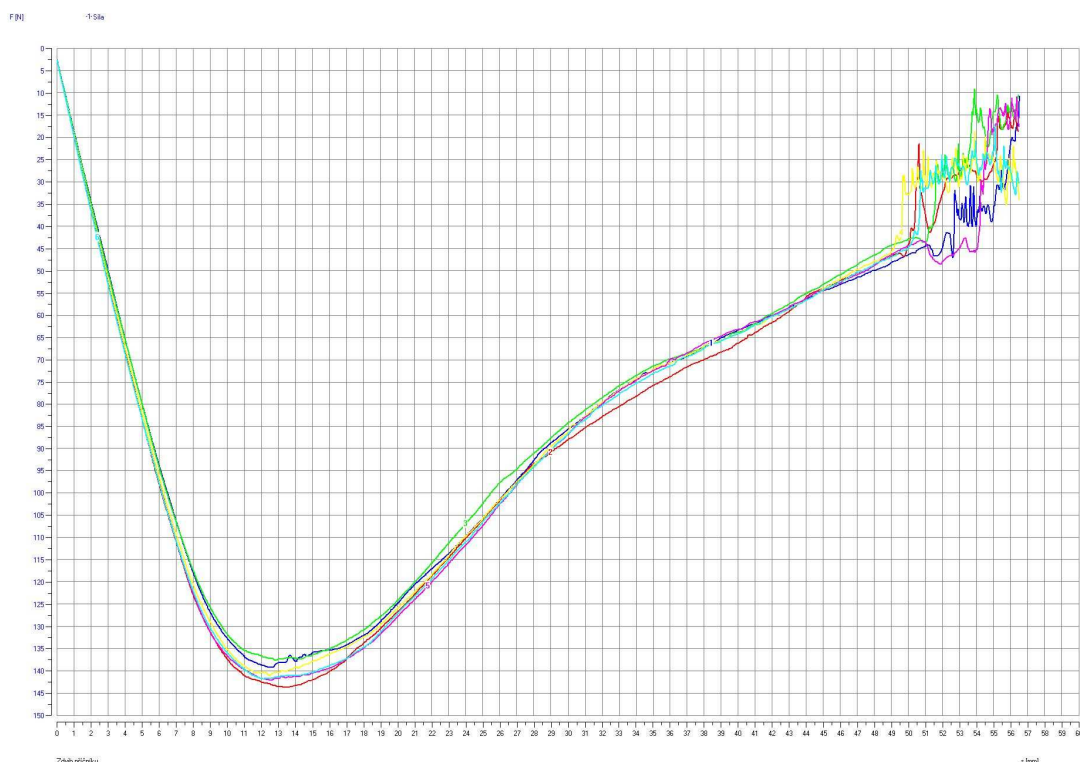
Obr.3.3.8.1: Průběh zkoušky vzorků série P1, závislost síly F [N] na průhybu s [mm]

Vzorky série P2 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.3.8.2: Průběh zkoušky vzorků série P2, závislost síly F [N] na průhybu s [mm]

Vzorky série P3 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.3.8.3: Průběh zkoušky vzorků série P3, závislost síly $F[N]$ na průhybu $s[mm]$

3.3.9 Vypočtené hodnoty

Z naměřených hodnot byly pomocí vzorce (2.6.2) vypočteny hodnoty pevnosti v ohybu σ_{fM} a vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky (tab. 3.3.9)

Tab. 3.3.9: Výsledné průměrné hodnoty při zkoušce ohybem při teplotě 23°C.

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s
vzorek č.	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
1.	149,938	12,96	147,844	12,90	145,802	12,65
2.	152,922	13,72	147,530	13,83	150,409	13,51
3.	152,556	12,14	149,571	13,66	144,127	12,84
4.	149,571	13,62	150,252	13,22	147,582	12,48
5.	152,608	12,41	149,414	13,71	148,786	12,61
6.	150,671	12,84	149,362	13,73	148,420	12,13
Směrodatná odchylka	1,491	0,63	1,067	0,37	2,246	0,46
Průměr	151,378	12,95	148,996	13,51	147,521	12,70

3.4 Ohybová zkouška při teplotě 0°C

3.4.1 Vzorky

3 série vzorků

série P1 – výrobní šarže 8120344

série P2 – výrobní šarže 9120004

série P3 – výrobní šarže 8120011

3.4.2 Podmínky při zkoušce

Kondicionování: vzorky umístěny v chladicí komoře min. 2 hod při -7°C

Okolní teplota: teplota v laboratoři 23±2,5°C

Zařízení: zařízení pro tahové a tlakové zkoušky
se zatěžovacím trnem a podpěrami

Zatěžovací trn: poloměr 5,0mm

Podpěry: rozpětí 70mm

Měřicí délka: max. 56,5mm - od přepětí (dotyku zkušebního tělíska se vzorkem)

Rychlost posuvu: 25mm/min

Zkouška končí dosažením průhybu max. 56,5mm.

Zaznamenané hodnoty :

- maximální síla **F** [N]
- průhyb **s** vzorku při maximální síle [mm]

3.4.3 Rozměry střední části vzorků pásek

Všechny vzorky byly vystříknuty na standardní rozměr (tab. 3.4.3) určený normou.

Tab. 3.4.3: Rozměry zkušebních vzorků

vzorek č.	série P1	série P2	série P3
	rozměry v mm	rozměry v mm	rozměry v mm
1.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
2.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95
3.	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95	l.110; b.10,1; h.3,95

délka=l; šířka=b; tloušťka=h

3.4.4 Naměřené hodnoty

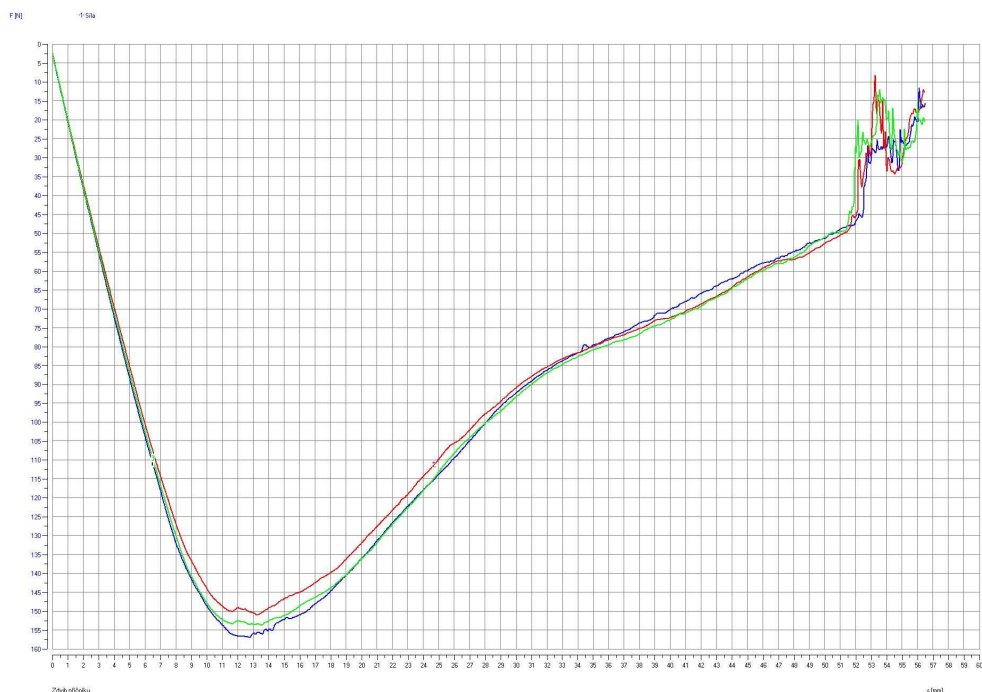
Hodnoty naměřené při zkoušce byly pro přehlednost zaznamenány do tab. 3.4.4.

Tab. 3.4.4: Naměřené hodnoty při zkoušce ohybem

	série P1		série P2		série P3	
vzorek č.	Síla	Průhyb	Síla	Průhyb	Síla	Průhyb
	N	mm	N	mm	N	mm
1.	156,950	12,96	154,000	13,46	148,300	13,46
2.	150,950	13,72	152,100	13,45	148,950	11,88
3.	153,700	12,84	149,550	13,29	148,450	12,56

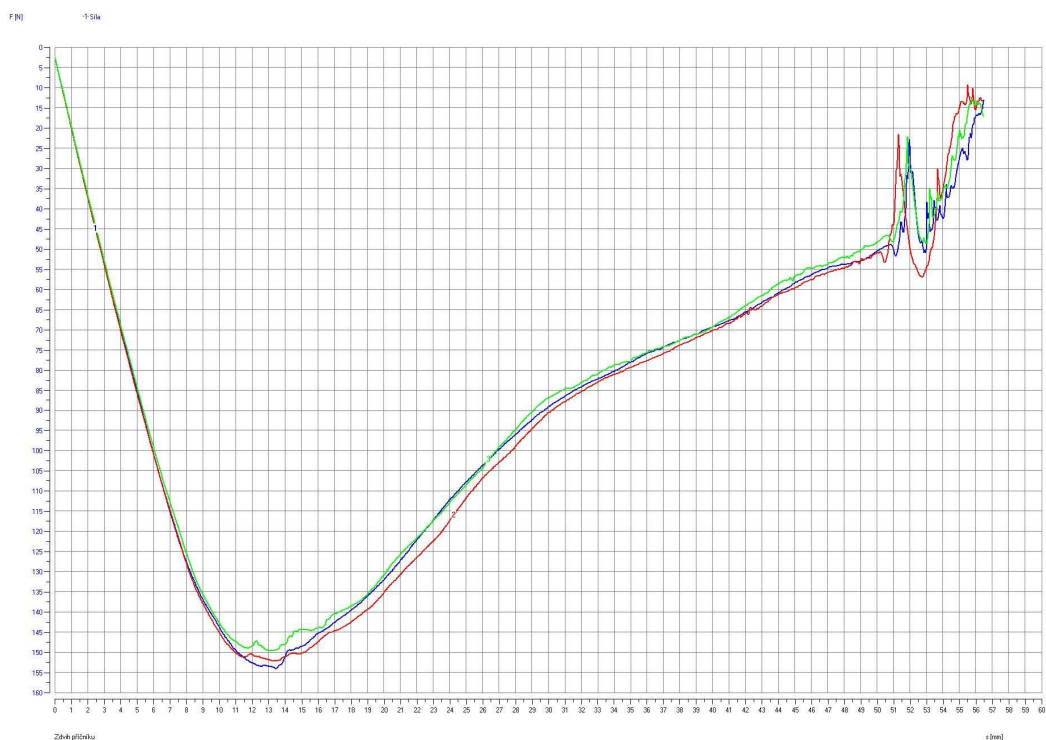
3.4.5 Průběh zkoušek - grafy

Vzorky série P1 - graf průběhu zkoušky



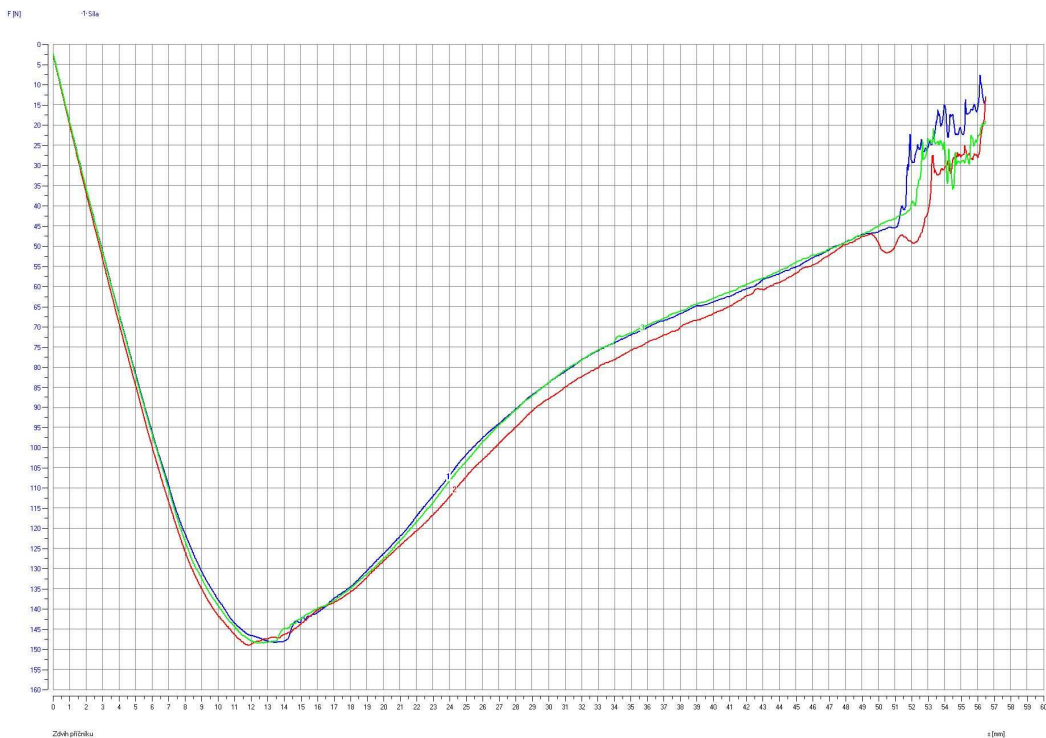
Obr.3.4.5.1: Průběh zkoušky vzorků P1, závislost síly $F[N]$ na průhybu $s[mm]$

Vzorky série P2 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.4.5.2: Průběh zkoušky vzorků P2, závislost síly $F[N]$ na průhybu $s[mm]$

Vzorky série P3 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.4.5.3: Průběh zkoušky vzorků P3, závislost síly $F[N]$ na průhybu $s[mm]$

3.4.6 Vypočtené hodnoty

Z naměřených hodnot byly pomocí vzorce (2.6.2) vypočteny hodnoty pevnosti v ohybu σ_{fM} a vypočteny průměrné hodnoty (tab.3.4.6).

Tab. 3.4.6: Výsledné průměrné hodnoty při zkoušce ohybem při teplotě 0°C

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fM}	Průhyb s
vzorek č.	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
1.	164,335	12,96	161,246	13,46	155,278	13,46
2.	158,053	13,72	159,257	13,45	155,958	11,88
3.	160,932	12,84	156,587	13,29	155,435	12,56
Směrodatná odchylka	3,145	0,48	2,338	0,10	0,356	0,79
Průměr	161,106	13,17	159,030	13,40	155,557	12,63

3.5 Tahová zkouška

3.5.1 Vzorky

3 série vzorků (viz obr.3.6.5):

série P1 – výrobní šarže 8120344

série P2 – výrobní šarže 9120004

série P3 – výrobní šarže 8120011

3.5.2 Podmínky při zkoušce

Okolní teplota: teplota v laboratoři $23 \pm 2,5^\circ\text{C}$

Zařízení: zařízení pro tahové a tlakové zkoušky
s použitím mechanických nesamosvorných čelistí

Měřicí délka: rozestup čelistí 110 mm = výchozí měřicí délka

Rychlost posuvu: 25mm/min

Zkouška končí přetržením zkušebního vzorku.

Zaznamenané hodnoty – (viz obr.3.5.8.1-3):

- maximální síla **F** [N]
- maximální prodloužení při přetržení zkušebního vzorku **ΔL_o** [mm]

3.5.3 Rozměry střední části vzorků pásek

Všechny vzorky byly vystříknuty na standardní rozměr (tab.3.5.3) určený normou.

Tab. 3.5.3: Rozměry zkušebních vzorků

vzorek č.	série P1	série P2	série P3
	rozměry v mm	rozměry v mm	rozměry v mm
1.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm
2.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm
3.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm
4.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm
5.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm
6.	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm	10,05 x 4,05 mm

3.5.4 Naměřené hodnoty

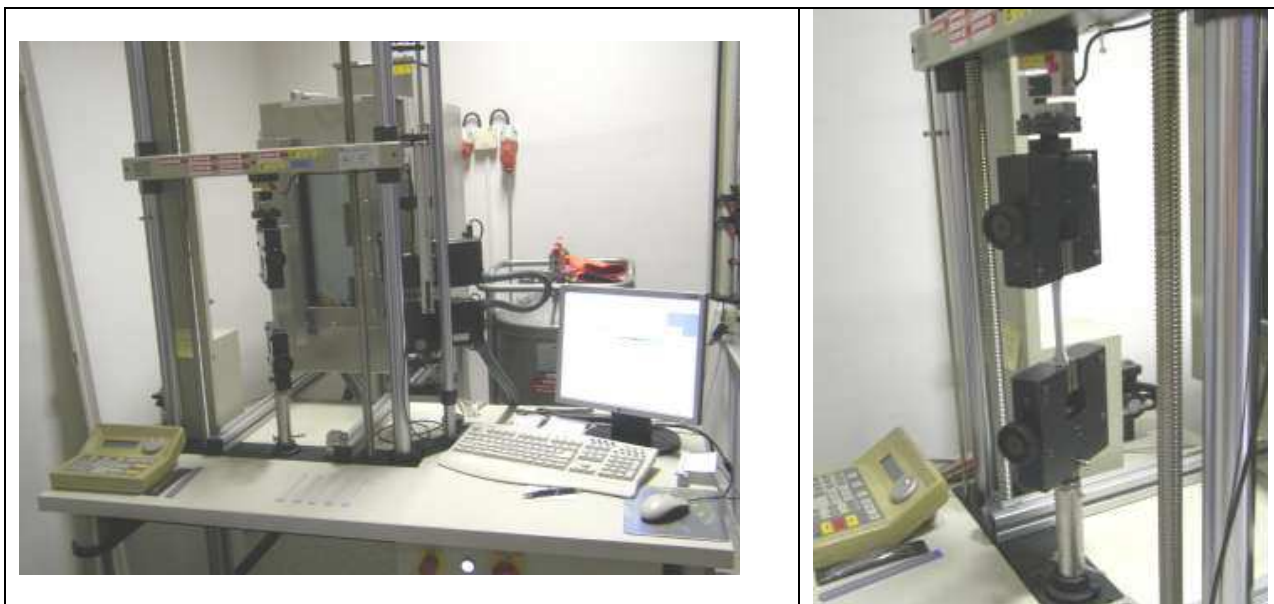
Hodnoty naměřené při zkoušce byly přepočteny dle vzorce (2.4.2) a pro přehlednost zaznamenány do tab. 3.5.4.

Tab. 3.5.4: Výsledné průměrné hodnoty při zkoušce tahem při teplotě 23°C

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}
vzorek č.	Mpa	%	MPa	%	MPa	%
1.	63,216	30,41	58,043	8,77	59,758	20,44
2.	62,078	12,39	59,36	10,57	59,822	58,61
3.	53,562	9,35	60,722	9,22	59,398	63,90
4.	62,029	19,27	56,946	8,31	59,709	34,73
5.	53,338	7,67	61,332	10,01	59,429	41,23
6.	54,952	18,41	57,381	8,47	60,227	45,39
Směrodatná odchylka	4,702	8,37	1,805	0,90	0,302	15,87
Průměr	58,196	16,25	58,964	9,22	59,724	44,05

3.5.5 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení pro zkoušku tahem (obr. 3.5.5) bylo propojeno s osobním počítačem a výsledné hodnoty odečítány z LCD displeje



Obr.3.5.5: Zkušební zařízení pro tahové a tlakové zkoušky

3.5.6 Vyobrazení zkušebních vzorků

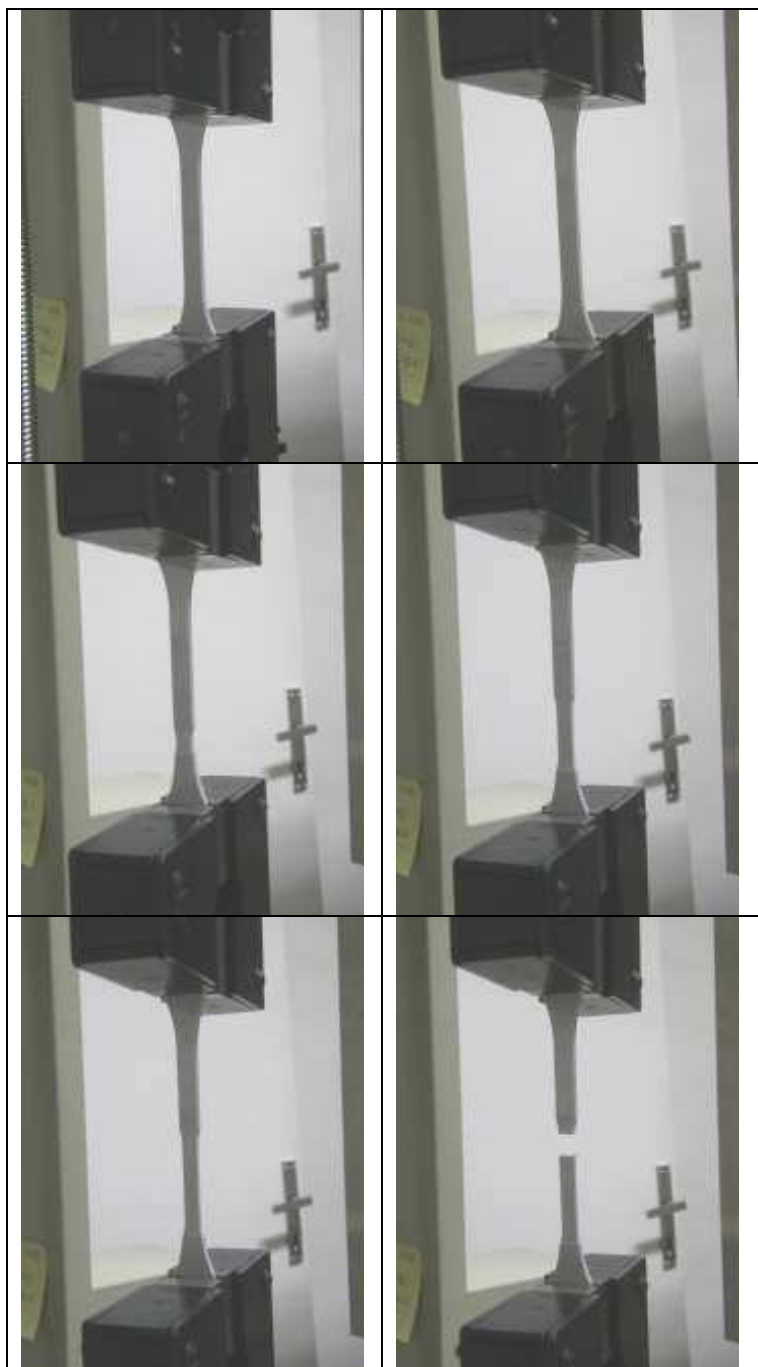
Pro přehlednost byly zkušební vzorky před a po zkoušce zaznamenány a seřazeny (obr. 3.5.6)



Obr.3.5.6: Zkušební vzorky před a po zkoušce

3.5.7 Orientační zobrazení průběhu zkoušky

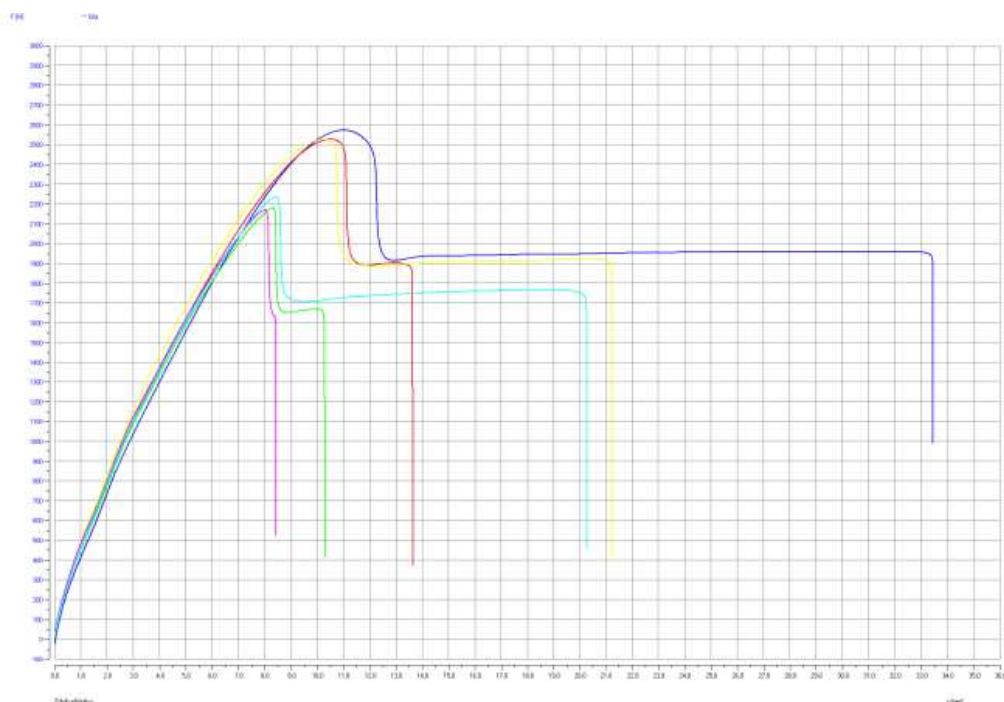
Průběh všech zkoušek byl zaznamenán na videokameru a ze záznamu byly pořízeny statické fotografie průběhu zkoušky (obr.3.5.7).



Obr.3.5.7: Průběh zkoušky

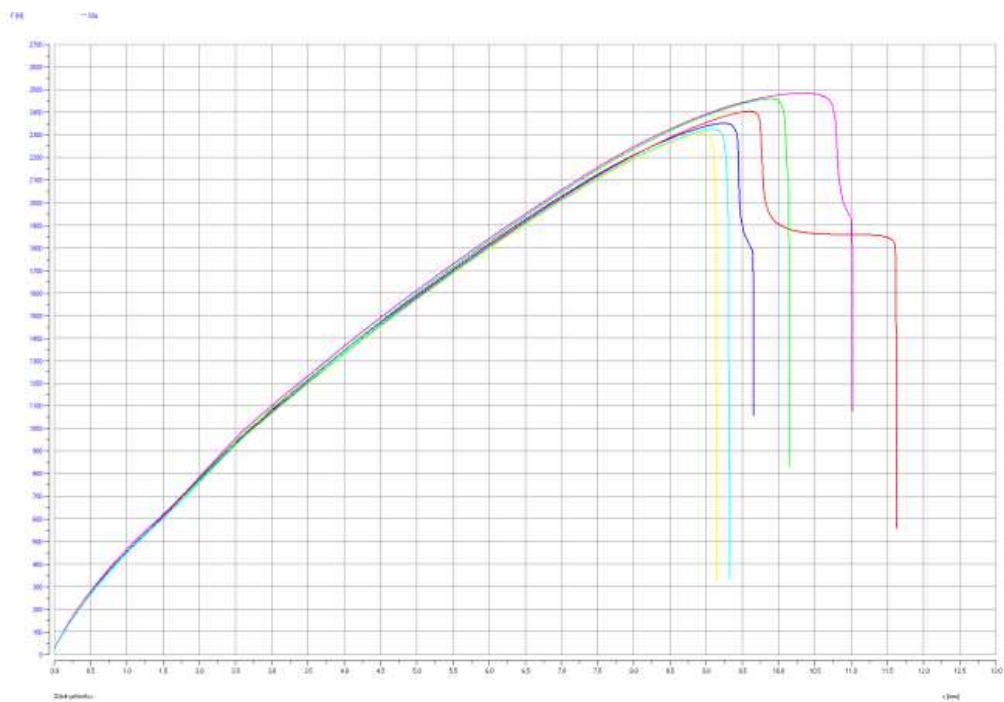
3.5.8 Průběh zkoušek - grafy

Vzorky série P1 - graf průběhu zkoušky



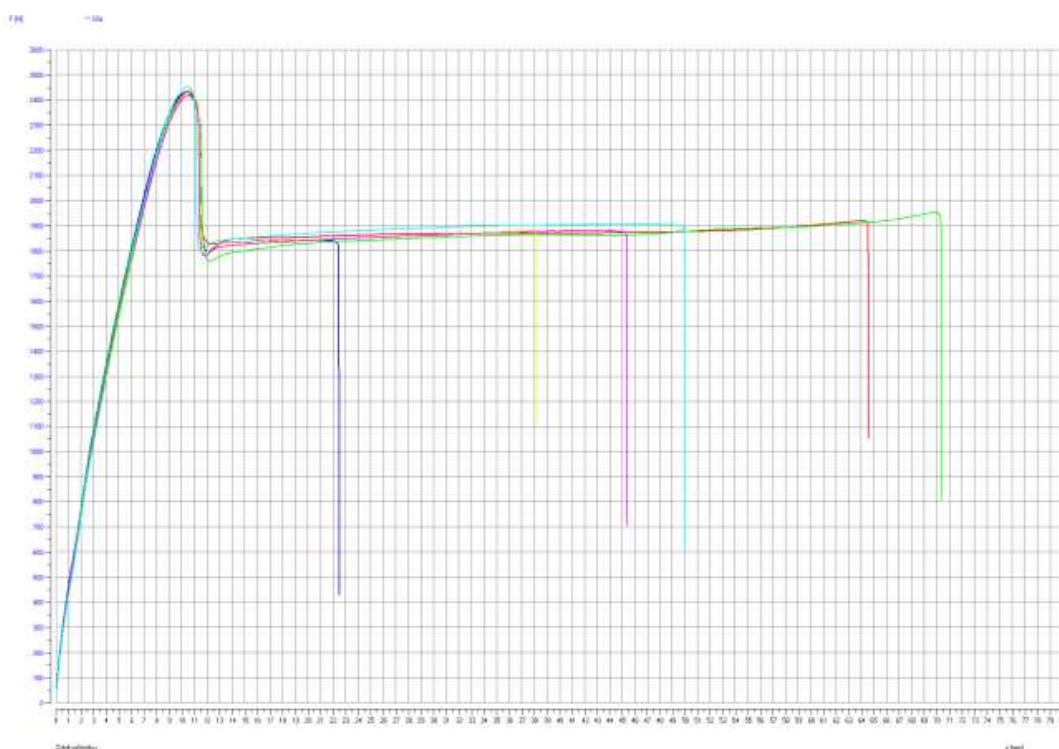
Obr.3.5.8.1: Průběh zkoušky vzorků série P1, závislost síly F [N] na prodloužení [mm]

Vzorky série P2 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.5.8.2: Průběh zkoušky vzorků série P2, závislost síly F [N] na prodloužení [mm]

Vzorky série P3 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.3.8.3: Průběh zkoušky vzorků série P3, závislost síly $F[N]$ na prodloužení $[mm]$

3.6 Tahová zkouška při teplotě $0^{\circ}C$

3.6.1 Vzorky

3 série vzorků:

série P1 – výrobní šarže 8120344

série P2 – výrobní šarže 9120004

série P3 – výrobní šarže 8120011

3.6.2 Podmínky při zkoušce

Kondicionování: vzorky umístěny v chladicí komoře min. 2 hod při $-7^{\circ}C$

Okolní teplota: teplota v laboratoři $23 \pm 2,5^{\circ}C$

Zařízení: zařízení pro tahové a tlakové zkoušky
s použitím mechanických nesamosvorných čelistí

Měřicí délka: rozestup čelistí 110 mm = výchozí měřicí délka

Rychlost posuvu: 25 mm/min

Zkouška končí přetržením zkoušeného vzorku.

Zaznamenané hodnoty – (viz obr. 3.6.5.1-3):

- maximální síla $F [N]$
- maximální prodloužení při přetržení zkušebního vzorku $\Delta L_o [mm]$

3.6.3 Rozměry střední části vzorků

Všechny vzorky byly vystříknuty na standardní rozměr (tab.3.6.3) určený normou.

Tab. 3.6.3: Rozměry zkušebních vzorků

vzorek č.	série P1	série P2	série P3
1.	10,05 x 4,05mm	10,00 x 4,05mm	10,05 x 4,05mm
2.	10,05 x 4,05mm	10,00 x 4,05mm	10,05 x 4,05mm
3.	10,05 x 4,05mm	10,00 x 4,05mm	10,05 x 4,05mm

3.6.4 Naměřené hodnoty

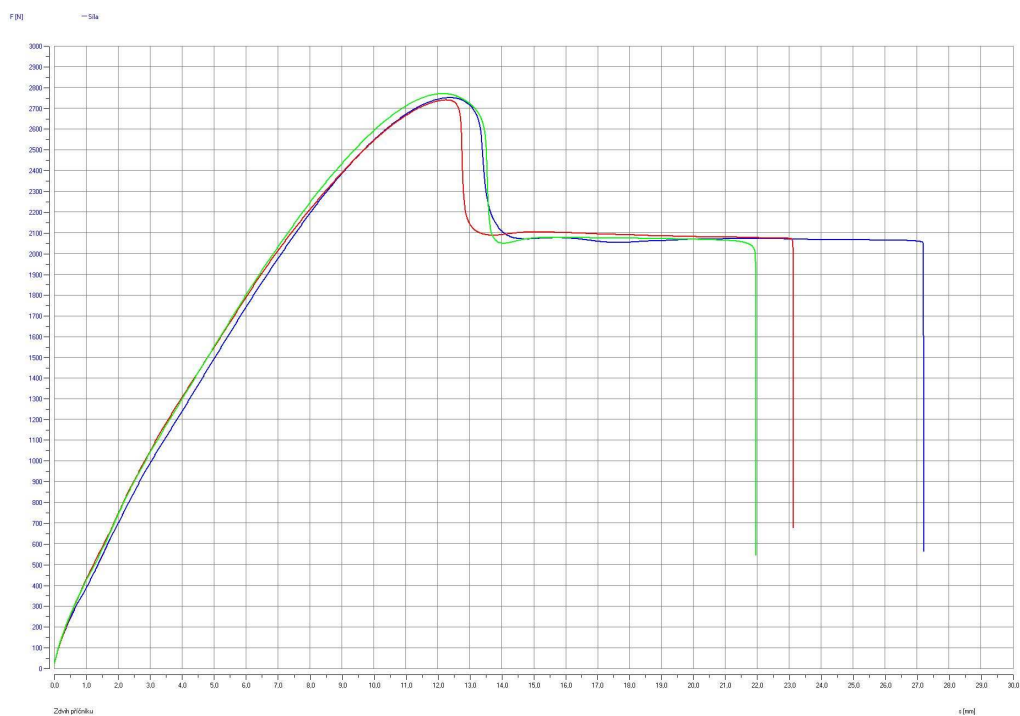
Hodnoty naměřené při zkoušce byly přepočteny dle vzorce (2.4.2) a pro přehlednost zaznamenány do tab. 3.6.4.

Tab. 3.6.4: Výsledné průměrné hodnoty při zkoušce tahem

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}	Pevnost v tahu σ_M	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB}
vzorek č.	MPa	%	MPa	%	MPa	%
1.	67,592	24,71	65,591	17,92	65,437	65,45
2.	67,314	21,01	66,68	15,42	63,475	47,20
3.	68,068	19,94	65,091	12,08	64,263	55,35
Směrodatná odchylka	0,381	2,51	0,812	2,93	0,987	9,14
Průměr	67,658	21,89	65,787	15,14	64,392	56,00

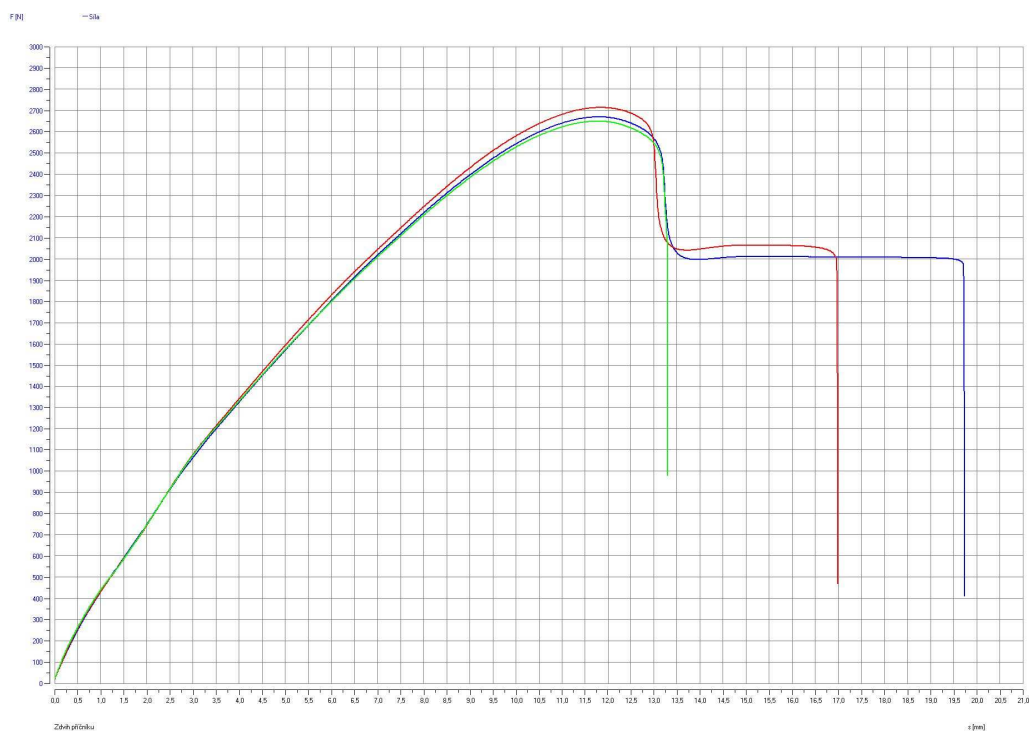
3.6.5 Průběh zkoušek - grafy

Vzorky série P1 - graf průběhu zkoušky



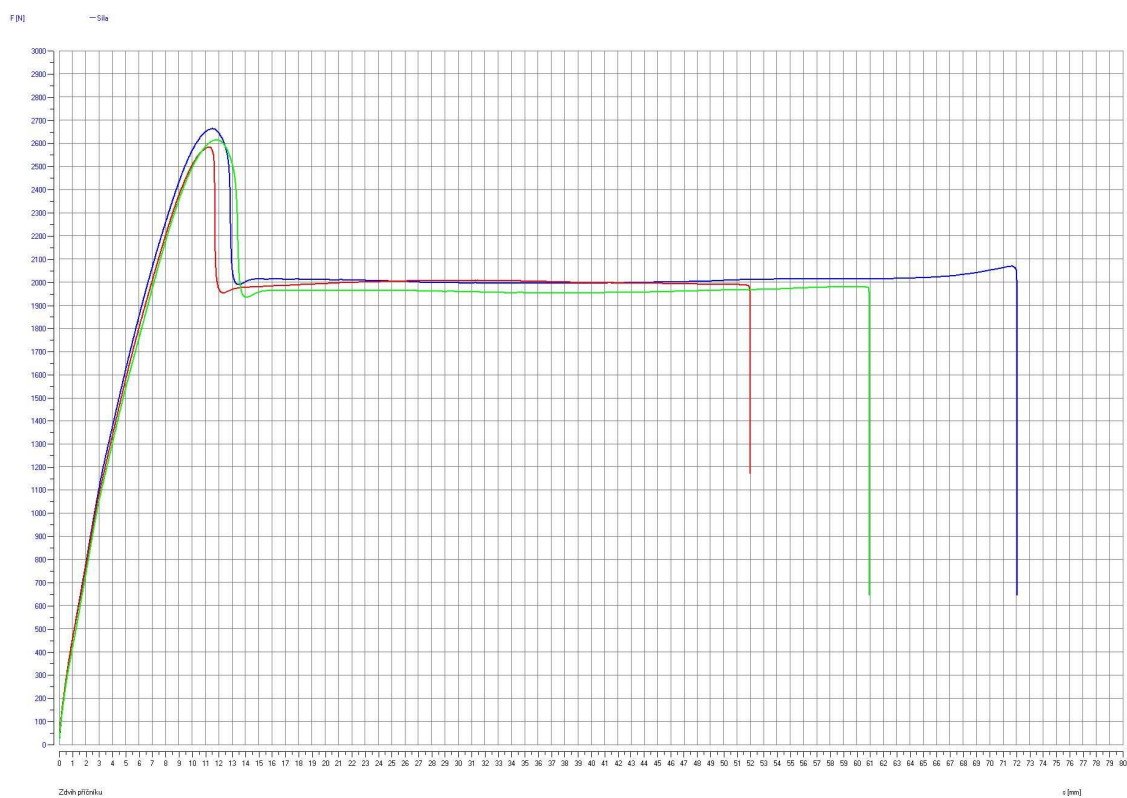
Obr.3.6.5.1: Průběh zkoušky vzorků série P1, závislost síly F [N] na prodloužení [mm]

Vzorky série P2 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.6.5.2: Průběh zkoušky vzorků série P2, závislost síly F [N] na prodloužení [mm]

Vzorky série P3 - graf průběhu zkoušky



Obr.3.6.5.3: Průběh zkoušky vzorků série P3, závislost síly F [N] na prodloužení [mm]

4. Rozbor získaných výsledků

4.1 Rozbor výsledků - ohybové vlastnosti 23°C

Na základě provedených zkoušek bylo zjištěno, že v případě zkoušky dle **ČSN EN ISO 178 – Plasty – stanovení ohybových vlastností**, vykazovaly **při teplotě 23°C** největší průhyb **s** vzorky výrobní šarže P2 (tab.4.1).

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami průhybu **s** všech šarží činil 0,56 mm. Minimální hodnota průměrného průhybu **s** byla 12,95 mm a maximální hodnota průměrného průhybu **s** byla 13,51 mm.

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami pevnosti v ohybu σ_{fm} pro všechny šarže činil 3,857 MPa. Minimální hodnota pevnosti v ohybu σ_{fm} byla 147,521 MPa a maximální hodnota pevnosti v ohybu σ_{fm} byla 151,378 MPa.

Zkoušeno bylo vždy šest vzorků od každé šarže, tj. celkem 18 kusů.

Tab. 4.1 Výsledné hodnoty ohybových vlastností pro jednotlivé šarže a teploty

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v ohybu σ_{fm}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fm}	Průhyb s	Pevnost v ohybu σ_{fm}	Průhyb s
	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
Směrodatná odchylka 23°C	1,491	0,63	1,067	0,37	2,246	0,46
Směrodatná odchylka 0°C	3,145	0,479	2,338	0,097	0,356	0,790
Průměr 23°C	151,378	12,95	148,996	13,51	147,521	12,70
Průměr 0°C	161,106	13,17	159,030	13,40	155,557	12,63
Konfidenční interval 23°C	150,184	12,44	148,142	13,22	145,724	12,33
	152,571	13,46	149,850	13,80	149,318	13,07
Konfidenční interval 0°C	157,548	12,63	156,384	13,29	155,154	11,74
	164,665	13,72	161,675	13,51	155,960	13,53

4.2 Rozbor výsledků - ohybové vlastnosti 0°C

Při zkouškách dle **ČSN EN ISO 178 – Plasty – stanovení ohybových vlastností** konaných **při teplotě 0°C**, nejhorších hodnot průhybu **s** opět dosahovaly vzorky z výrobní šarže P2 (tab.4.1).

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami průhybu **s** pro všechny šarže činil 0,76 mm. Minimální hodnota průměrného průhybu **s** byla 12,63 mm a maximální hodnota průměrného průhybu **s** byla 13,40 mm.

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami pevnosti v ohybu σ_{fM} pro všechny šarže činil 5,549 MPa. Minimální hodnota pevnosti v ohybu σ_{fM} byla 155,557 MPa a maximální hodnota pevnosti v ohybu σ_{fM} byla 161,106 MPa.

V tomto případě byly výsledky získány z důvodu finanční náročnosti této zkoušky pouze ze tří zkoušených vzorků od každé výrobní šarže, celkem bylo tedy zkoušce podrobena 9 zkušebních vzorků.

4.3 Rozbor výsledků - tahové vlastnosti 23°C

Výsledné hodnoty naměřené při zkoušce dle **ČSN EN ISO 527 – Plasty – Stanovení tahových vlastností při teplotě 23°C** opět ukázaly, že nejnižší hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} vykazují vzorky výrobní šarže P2 (tab. 4.3).

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} pro všechny šarže činil 34,78%. Minimální hodnota průměrného jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byla 9,22% a maximální hodnota průměrného jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byla 44%.

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami pevnosti v tahu σ_M pro všechny šarže činil 1,528 MPa. Minimální hodnota pevnosti v tahu σ_M byla 58,196 MPa a maximální hodnota pevnosti v tahu σ_M byla 59,724 MPa.

Zkoušeno bylo v tomto případě šest vzorků od každé výrobní šarže, celkem tedy 18 vzorků a výsledek byl dosažen pomocí průměru ze všech naměřených hodnot.

Tab. 4.3 Výsledné hodnoty tahových vlastností pro jednotlivé šarže a teploty

	série P1		série P2		série P3	
	Pevnost v tahu σ_M MPa	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB} %	Pevnost v tahu σ_M MPa	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB} %	Pevnost v tahu σ_M MPa	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tB} %
Směrodatná odchylka 23°C	4,702	8,37	1,805	0,90	0,302	15,9
Směrodatná odchylka 0°C	0,381	2,51	0,812	2,93	0,987	9,1
Průměr 23°C	58,196	16,25	58,964	9,22	59,724	44,0
Průměr 0°C	67,658	21,89	65,787	15,14	64,392	56,0
Konfidenční interval 23°C	54,433	9,55	57,520	8,51	59,482	31,35
	61,958	22,95	60,408	9,94	59,966	56,75
Konfidenční interval 0°C	67,227	19,05	64,868	11,82	63,274	45,66
	68,089	24,72	66,707	18,46	65,509	66,34

4.4 Rozbor výsledků - tahové vlastnosti 0°C

Zkouškou dle **ČSN EN ISO 527 – Plasty – Stanovení tahových vlastností při teplotě 0°C** bylo zjištěno, že nejnižší hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byly opět zaznamenány u vzorků z výrobní šarže P2 (tab. 4.3).

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} pro všechny šarže činil 40,86%. Minimální hodnota průměrného jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byla 15,14% a maximální hodnota průměrného jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byla 56%.

Maximální rozdíl mezi průměrnými hodnotami pevnosti v tahu σ_M pro všechny šarže činil 3,266 MPa. Minimální hodnota pevnosti v tahu σ_M byla 64,392 MPa a maximální hodnota pevnosti v tahu σ_M byla 67,658 MPa.

Výsledků bylo dosaženo opět z důvodu finanční náročnosti této zkoušky, pouze ze tří zkoušených vzorků od každé výrobní šarže.

4.5. Rozbor výsledků – shrnutí

ČSN EN ISO 179 – Plasty - Stanovení tahových vlastností ani ČSN EN ISO 178 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností, nedefinuje shodnosti metod zkoušení, vyjma ČSN EN ISO 178/A1, která definuje shodnosti stanovení napětí v ohybu při smluvním průhybu 3,5% a shodnosti stanovení modulu pružnosti v ohybu, což nebylo předmětem výsledků zkoušek.

Při porovnání výrobní šarže a vlivu teploty na výsledné hodnoty mechanických vlastností (pevnost v ohybu a průhyb), které byly získány při zkouškách ohybem při teplotě 23°C nebo 0°C (tab. 4.1) , bylo zjištěno, že nejnižší průměrná hodnota pevnosti v ohybu σ_{fM} jednotlivých šarží při výše uvedených teplotách je o 8,5% nižší, než maximální dosažená hodnota, a že maximální dosažená hodnota průhybu s je o 6% vyšší než hodnota minimální, a protože mechanické vlastnosti vstupního materiálu mají pouze dílčí vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti konečného produktu (o jeho kvalitě rozhodují rovněž technologické parametry, konstrukce formy i volba stroje), lze konstatovat, že změna šarže při výrobě obalu svítidel nemá na výsledné mechanické vlastnosti zásadní vliv a to ani při rozdílných teplotách.

Podobné závěry vyplývají rovněž z porovnání výsledků všech šarží u zkoušek tahem při 23°C a 0°C (tab. 4.3), kdy nejnižší průměrná hodnota pevnosti v tahu σ_M je o 14% nižší, než maximální dosažená hodnota.

Při porovnání vlivu výrobní šarže a vlivu teploty na hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byly zjištěny větší rozdíly u získaných hodnot. Protože však výsledné produkty v praxi nejsou vystaveny namáhání za mezí pevnosti v tahu, lze i v tomto případě konstatovat, že změna šarže při výrobě obalu svítidel nemá na výsledné mechanické vlastnosti zásadní vliv a to ani při rozdílných teplotách.

5. Závěr

V teoretické části byl proveden rozbor principu vstřikování plastů, faktorů ovlivňujících vlastnosti a kvalitu výstřiku, popsány vlastnosti a uvedeno použití polykarbonátu v různých průmyslových odvětvích. Dále byl uveden popis vybraných mechanických zkoušek plastů a to zkouška tahem a zkouška ohybem.

Protože se práce zabývá vlivem výrobní šarže na mechanické vlastnosti polykarbonátu, jsou tyto vlastnosti testovány pomocí tahových a ohybových zkoušek, které byly provedeny za rozdílných teplot.

V experimentální části byl popsán zkoušený materiál a vyspecifikovány odebrané vzorky jednotlivých výrobních šarží, na kterých byly provedeny tahové a ohybové zkoušky při teplotě 23°C a 0°C.

Bylo zjištěno, že největší průhyb s i nejnižší hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byly zjištěny u vzorků z výrobní šarže P2. Zajímavé je, že nižší hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tB} byly zjištěny při tahové zkoušce za teploty 23°C a nikoliv při 0°C.

Tato skutečnost ovšem nic nemění na faktu, že se vliv výrobní šarže zkoumané v této práci nepodílí zásadním způsobem na výsledných mechanických vlastnostech polykarbonátu R30, ze kterého se vstřikováním vyrábějí základny a difuzory průmyslových zářivkových svítidel.

LITERATURA

- [1] Katalog a technické listy firmy Trevos, a.s., 2009
- [2] LENFELD, P.: Technologie II. - za podpory projektu FRVŠ 1998/2005
"Internetová podpora výuky technologie tváření kovů a plastů.
- [3] Příručky firmy Arla Plast s.r.o. a GE Plastics, a.s.
- [4] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů – část 1.
TU v Liberci, 2006
- [5] ČSN EN ISO 178 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností – Část 1:
Základní principy, ČNI, 2003
- [6] ČSN EN ISO 527-1 – Plasty – Stanovení tahových vlastností, ČNI, 1997
- [7] ČSN - ČSN EN ISO 527-2 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností –
Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty, ČNI, 1998

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Turnově dne 5.1.2010

.....

Martin Kovář

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Turnov the 5th January 2010

.....

Martin Kovář